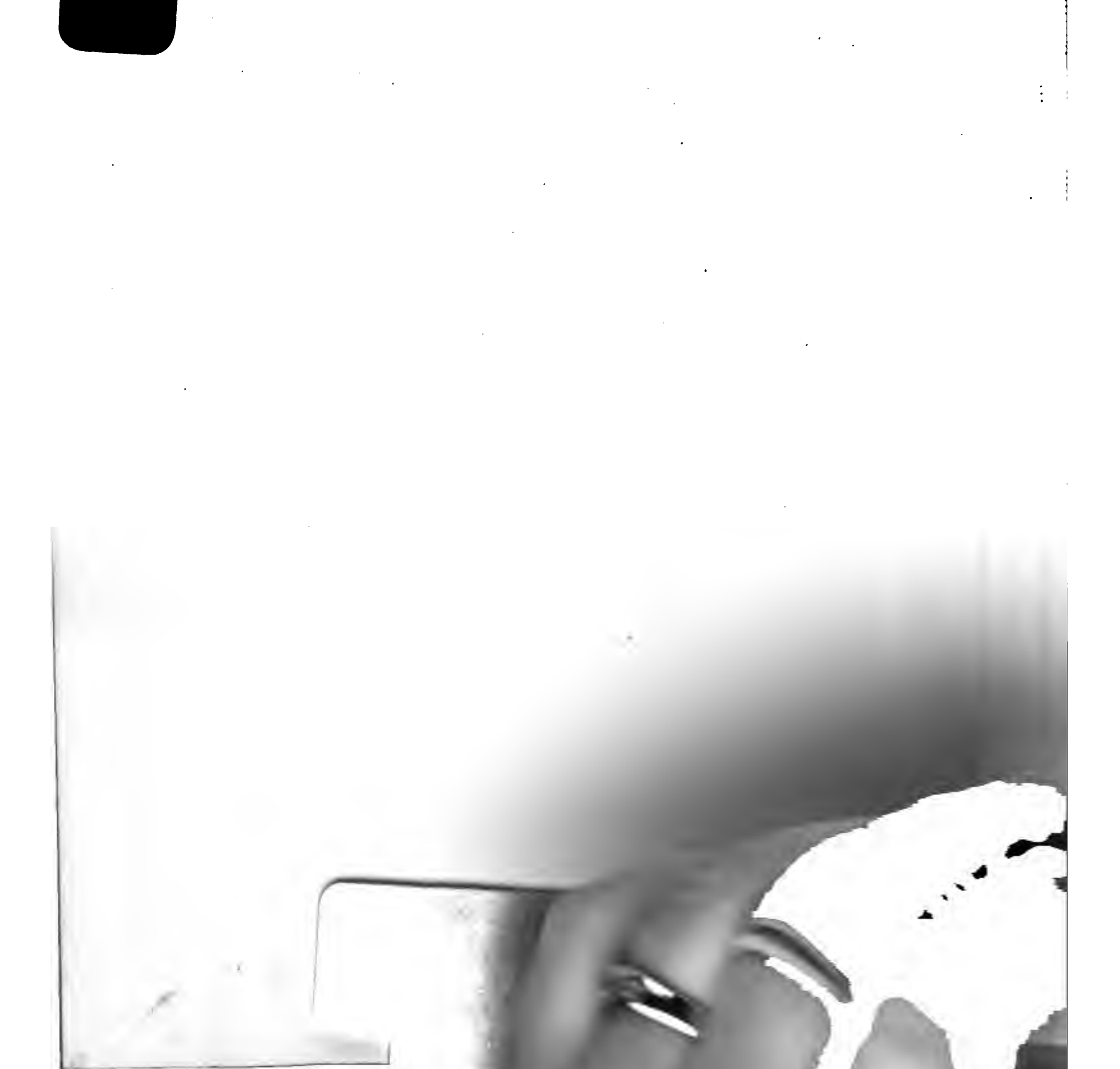
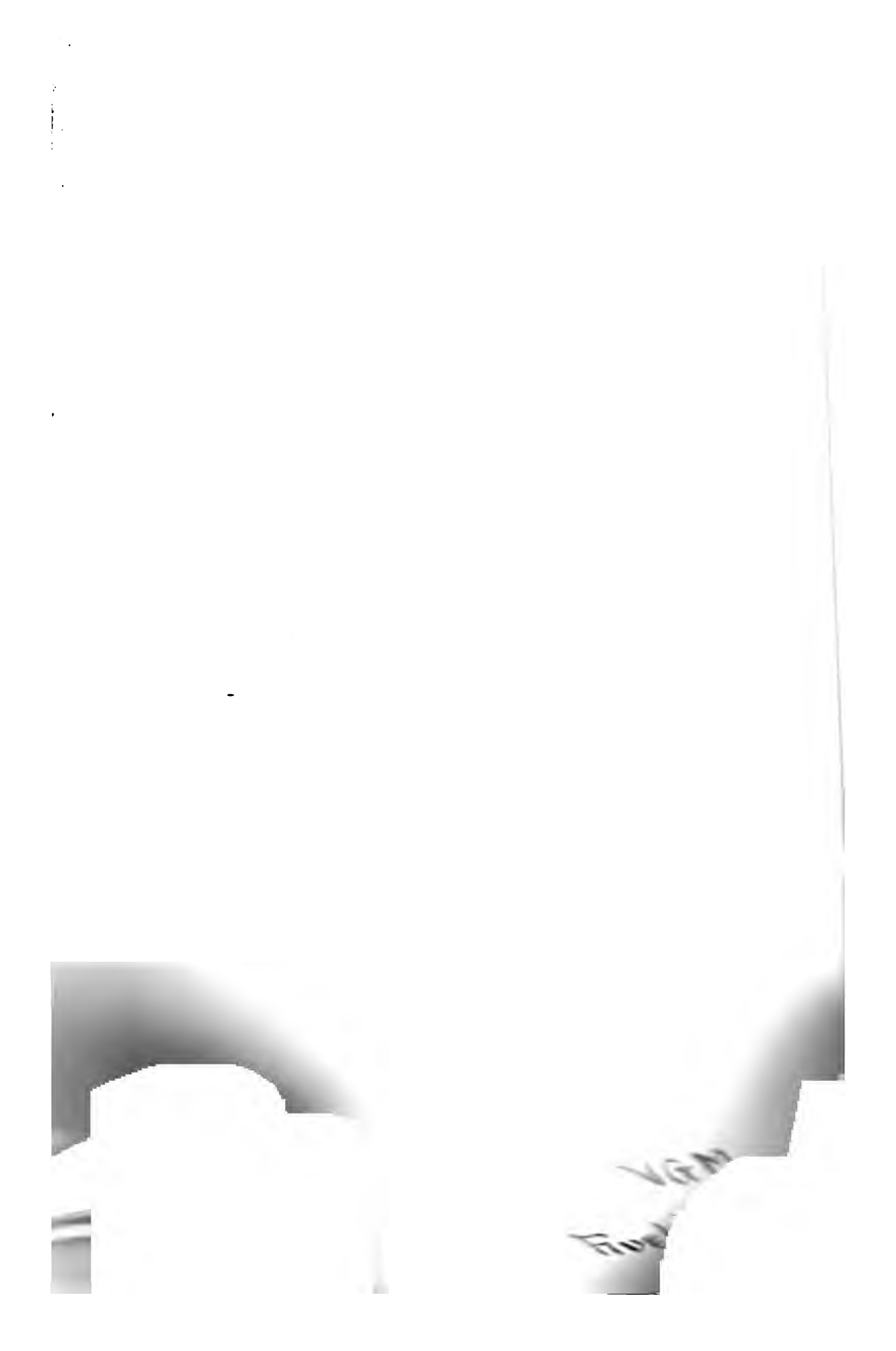

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06642431 2







GRUNDZÜGE

der

WECHSELSTROM-TECHNIK

Eine gemeinfassliche Darstellung der Grundlagen

der

Elektrotechnik der Wechsel- und Mehrphasenströme

für

Ingenieure, Architekten, Industrielle, Militärs, Techniker und Studierende an technischen Mittelschulen.

Mit 261 Abbildungen und 1 Tafel.

Von

RICHARD RÜHLMANN

Dr. phil. und Professor.

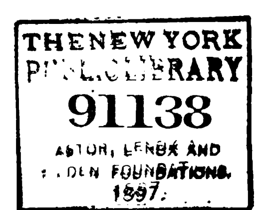
Zugleich Ergänzungsband zu:
Grundzüge der Elektrotechnik der Starkströme.



LEIPZIG

VERLAG VON OSKAR LEINER

1897.


THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
91138
ASTOR, LENOX AND
FOUNDATIONS.
1897.

Vorwort.

Die bedeutungsvollsten und für das gesamte industrielle Leben wichtigsten neuen Fortschritte auf dem Gebiete der Elektrotechnik beziehen sich auf die Erzeugung, Umformung und Verwendung der Wechselströme und Mehrphasenströme.

Eine zusammenfassende Darstellung dieser Fortschritte hat bisher, obwohl vielfach begehrt, noch gefehlt. Und so war dem Verfasser von den verschiedensten Seiten wiederholt der Wunsch ausgesprochen worden, gewissermassen als Fortsetzung seiner »Grundzüge der Elektrotechnik«, nunmehr auch das Gebiet der Wechsel- und Mehrphasenströme in ähnlicher, gemeinverständlicher Weise zu bearbeiten.

Diesen Wunsch zu erfüllen, würde nicht möglich gewesen sein, wenn nicht gerade diejenigen Firmen, die vorzugsweise mit ihren Arbeiten und Konstruktionen die führende Stellung auf diesem Gebiete einnehmen, ihn in liebenswürdigster Weise durch Auskünfte und Mitteilungen von Zeichnungen und Beschreibungen unterstützt hätten.

Es ist das Bestreben des Verfassers gewesen, denjenigen In-[illegible]nieuren, Industriellen und Militärs, denen zu erschöpfenden, wissen-[illegible]ftlichen Studien über Wechsel- und Mehrphasenströme keine Zeit [illegible], ein möglichst anschauliches Bild davon zu geben, durch welche [illegible]htungen solche Ströme erzeugt, wie sie, dem wechselnden [illegible]nisse entsprechend, umgeformt werden, und in welcher Weise [illegible]erteilt und nutzbar gemacht werden können.

Für das Verständnis verschiedener Vorgänge auf diesem Gebiete ist die Bekanntschaft mit etwas eingehenderen mathematischen und physikalischen Betrachtungen nicht zu entbehren. Die in den vorzugsweise der Gleichstromtechnik gewidmeten »Grundzügen« gegebenen theoretischen Belehrungen reichen für den vorliegenden Zweck nicht völlig aus.

Diese Ergänzung der theoretischen Grundlagen ist vorzugsweise in den ersten drei Kapiteln zusammengestellt; einige die Mehrphasenströme betreffenden Erläuterungen sind in die betreffenden Abschnitte (Kap. VI und IX) eingeschaltet.

Auf den Gebrauch der Differential- und Integralrechnung ist durchaus verzichtet; von der Theorie überhaupt ist nur soviel mitgeteilt worden, als zum Verständnis der Konstruktionen, Anordnungen und Methoden unbedingt erforderlich ist.

Geringfügige Wiederholungen und Ergänzungen aus den Gebieten, die schon in den »Grundzügen« behandelt worden sind, waren dabei unvermeidlich, da das vorliegende Buch ein selbstständiges Ganzes bilden sollte.

Aus allem dürfte hervorgehen, dass die in den nachstehenden Blättern enthaltene Arbeit sich nicht in erster Linie an die wissenschaftlich gebildeten Elektrotechniker wendet. Deren Bedürfnisse sind durch die klassischen Werke von Gisbert Kapp,[1]) Bedell und Crehore, Feldmann, Steinmetz und Silvanus Thompson, die auch der Verfasser benutzt hat, nahezu vollständig befriedigt. Da aber einige Materialien hier überhaupt zum ersten Male weiteren Kreisen mitgeteilt werden, andere in Zeitschriften verstreute Angaben hier am entsprechenden Platze sich zusammengefasst vorfinden, können jüngere Fachgenossen das Buch zur Einführung in das Studium der Wechselstromtechnik und zur vorläufigen Orientierung gewiss mit Nutzen verwenden.

Als Hauptaufgabe hat es der Verfasser angesehen, den weiteren Kreisen, denen es mehr auf einen Einblick in dieses Gebiet, als auf das für den selbstthätig schaffenden Konstrukteur unerlässliche tiefgehende Verständnis ankommt, eine Übersicht über den in Frage kommenden Stoff zu geben.

Auf das Eingehen in verschiedene, lediglich den Fachmann interessierende Feinheiten musste daher verzichtet werden; ebenso sind nicht alle Möglichkeiten der Lösungen gewisser Aufgaben mitgeteilt, sondern mehrfach ist nur an einzelnen Beispielen gezeigt worden, auf welche Weise Schwierigkeiten überwunden werden können.

Der Verfasser hegt die Hoffnung, dass diese Darstellung auch dazu beitragen wird, die ablehnende Haltung überwinden zu helfen, die manche sonst dem Fortschritte durchaus zugeneigte Ingenieure und Industrielle bisher gegen die Einführung der Wechsel- und Mehrphasenströme in die Praxis lediglich deshalb gezeigt haben, weil ihnen diese neuen Systeme nicht völlig verständlich und durchsichtig waren. Besonders deshalb sind auch der Messung und der Verteilung dieser Ströme am Schlusse des Buches kurze Kapitel gewidmet.

Allen jenen Herren und Firmen, die den Verfasser in so gütiger Weise bei dieser Arbeit unterstützt haben, gestattet er sich an dieser Stelle den herzlichsten Dank abzustatten.

Möge diese Arbeit in den Kreisen, für die sie bestimmt ist, eine freundliche Aufnahme finden und dem Verständnis der immer wachsenden Bedeutung der elektrotechnischen Industrie für die gesamte Kultur nützliche Dienste leisten.

Döbeln, Mitsommer 1897.

Der Verfasser.

---

[1]) Die soeben neu erschienene 2. Auflage des trefflichen Buches von G. Kapp, Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselströme, konnte der Verfasser nicht mehr benutzen.

Inhaltsübersicht.

1. Kapitel.

Allgemeine Bemerkungen über den Wechselstrom.

2. Kapitel.

Wechselstromkreise mit Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität.

3. Kapitel.

Besondere Wirkungen der Wechselströme.

4. Kapitel.

Allgemeines über Wechselstrommaschinen.

Seite

5. Kapitel.

Die Einrichtungen einiger gebräuchlicher Wechselstrommaschinen.

6. Kapitel.

Wechselstrommaschinen für Mehrphasenströme.

7. Kapitel.

Transformatoren.

8. Kapitel.

Wechselstrommotoren und Zweiphasenmotoren.

9. Kapitel.

Die Drehstrommotoren.

10. Kapitel.

Messungen an Wechselströmen und Wechselstromapparaten.

11. Kapitel.

Regelung und Verteilung der Wechselströme.



1. Kapitel.

Allgemeine Bemerkungen über den Wechselstrom.

1. Wesen des Wechselstromes.

Wenn ein elektrischer Strom in regelmässiger Folge, von der Stärke Null anfangend, allmählich nach einem bestimmten Gesetze bis zu einer gewissen Grösse anwächst, dann allmählich wieder bis Null abnimmt und hierauf nach entgegengesetzter Richtung fliesst, wiederum bis zu einer der vorigen gleichen, aber negativen Stärke anwächst und nach derselben Zeit wie vorher wieder aufs neue bis Null sinkt, und dieser Vorgang sich in gleichen Zeiten in genau derselben Weise regelmässig wiederholt, so nennt man einen derartigen Strom einen »Wechselstrom«.

Die gleichen Zeiträume, nach deren Ablauf wir immer genau dieselbe Stärke und Richtung und die nämliche Wachstumstendenz des Stromes wiederfinden, sind »Perioden«. Jede Periode zerfällt in zwei Teile, während der Strom einmal seine Richtung wechselt. Die Anzahl der Perioden, die in einer Sekunde stattfindet, nennt man die »Frequenz« des Stromes. Jede Periode umfasst somit zwei Stromwechsel.

Bei den meisten Wechselströmen erfolgt das Anwachsen und die Abnahme des positiven Stromes nach demselben Gesetze, wie das Wachstum und die Abnahme des entgegengesetzt gerichteten Stromes, und zumeist ist der negative Höchstwert dem positiven Maximum gleich. Es giebt jedoch auch Wechselströme, welche nicht aus zwei gleichen, nur entgegengesetzt gerichteten Teilen innerhalb einer Periode bestehen. In den nachfolgenden Betrachtungen werden wir uns jedoch zumeist auf solche Fälle beschränken, bei welchen diese beiden Hälften gleich und symmetrisch sind. Und in der Hauptsache, sofern nichts anderes besonders erwähnt wird, wollen wir voraussetzen, dass der Verlauf des Wechselstromes durch eine einfache Sinuslinie dargestellt werden kann, d. h. durch eine Wellenlinie, deren positive und negative Teile kongruent sind, und dass die Änderung nach dem Sinusgesetze stattfindet.

Wie wir schon an anderer Stelle (Grundzüge der Elektrotechnik, VII, 4., S. 111) gezeigt haben, entsteht z. B. ein solcher Wechselstrom, wenn ein Leiter, z. B. eine Drahtspule, in einem gleichförmigen Kraftlinienfelde gedreht wird. Wir haben damals gezeigt, dass die in einer im gleichförmigen Magnetfelde rotierenden Spule erzeugte E M K dargestellt werden kann durch die Formel:

$$\text{E M K} = \frac{2\pi\,\text{u}\cdot\text{z}}{60}\,\text{B}\cdot\text{F}\cdot\sin 2\pi\,\frac{\text{t}}{\text{T}}.$$

Hierin bedeutet u die Anzahl der Umdrehungen des Leiters in einer Minute, z die Anzahl der Windungen, welche in dem Magnetfelde gedreht werden, und F die Fläche, welche jede dieser Windungen umschliesst. B ist die Feldstärke, d. h. die Anzahl von Kraftlinien, welche durch eine zur Richtung der Kraftlinien senkrechte Fläche von 1 *qcm* Inhalt hindurchgehen. Ferner ist t die Zeit, welche seit dem ersten Beginne der Drehung der Spule verflossen ist, und T die Dauer einer vollen Periode.

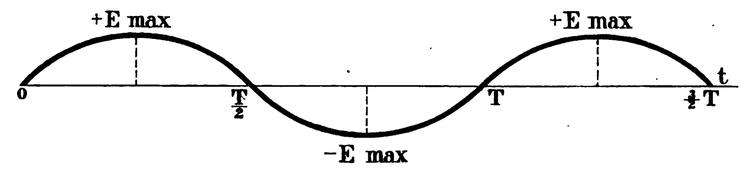


Fig. 1. Graphische Darstellung des Verlaufes eines einfachen Wechselstromes.

Ein solcher einfacher Verlauf einer E M K kann bildlich durch eine regelmässige Wellenlinie, eine Sinoide, dargestellt werden. (Vergl. Fig. 1.)

Ist die Spule nicht in sich geschlossen, sondern sind die Enden derselben mit einem Widerstande verbunden, der so gut wie keine Selbstinduktion besitzt, z. B. mit einer Anzahl Glühlampen oder mit einem in engem Zickzack auf- und niedersteigenden Kupferstreifen, so entsteht in diesem Widerstande ein Wechselstrom, dessen Stromstärke fast genau denselben Verlauf zeigt, wie ihn die Wellenlinie aufweist, durch die wir die Änderung der E M K dargestellt haben.

Trägt man in irgend einem Massstabe über derselben Geraden, durch die wir die Zeit graphisch dargestellt haben, als Ordinaten auch die Stromstärken auf, so erhält man in diesem Falle eine zweite Wellenlinie, die der Stromstärke, deren Gipfel und Thäler genau senkrecht über oder unter den Gipfeln und Thälern der Wellenlinie liegen, durch die wir die zeitlichen Veränderungen der E M K veranschaulicht haben. Beide Wellen gehen dann genau gleichzeitig durch

Null hindurch, nur die Höhe der Wellen ist je nach den für E M K und Stromstärke gewählten Masseinheiten verschieden.

Wenn dagegen im äussern Widerstand Drahtspulen oder gar Elektromagnete enthalten sind, oder wenn der Strom durch ein längeres Kabel fortgeleitet wird, das merkliche Kapazität besitzt, so treten gewisse Veränderungen ein. Dann fallen die Wellengipfel und Wellenthäler des in einem solchen Leiter erzeugten Stromes nicht mehr mit den der E M K zusammen, die ihn veranlasst; der Strom geht nicht zu demselben Zeitpunkte durch Null hindurch, zu der die E M K Null ist, nur die Frequenz, d. h. die Anzahl der Wellen, die innerhalb einer gewissen Länge der die Zeit darstellenden Abscissenlinie liegen, bleibt dieselbe. Der Strom besitzt dann gegen die E M K, die ihn hervorruft, einen Unterschied des Schwingungszustandes, den wir nach dem Sprachgebrauch der Wellenlehre mit dem Namen »Phasendifferenz« bezeichnen.

2. Praktische Bedeutung des Wechselstromes.

Die Fortleitung der menschlichen Sprache in Fernsprechanlagen erfolgt durch Wechselströme. Überall da, wo es sich um Energieübertragungen auf sehr grosse Entfernungen oder um Verteilung elektrischer Energie auf ausgedehnte Gebiete handelt, bedient man sich mit wirtschaftlichem Vorteil der Wechselströme.

Wenn elektrische Ströme auf lange Strecken fortgeleitet werden sollen, muss man mit sehr hohen Spannungen und geringen Stromstärken arbeiten, wenn man grosse Verluste in den Leitungen durch Stromwärme oder grosse Ausgaben für Leitungen von beträchtlichen Querschnitten vermeiden will.

Dynamomaschinen zur Erzeugung von Gleichstrom lassen sich nur schwer vollkommen betriebssicher für höhere Spannungen als für 1000 Volt herstellen, nicht nur weil die Isolation der Drähte leicht Schaden leidet, sondern besonders weil dann die isolierenden Zwischenräume benachbarter Kollektorsegmente durch Lichtbogen überbrückt und dadurch die Maschine der Zerstörung preisgegeben werden kann.

Ausserdem kann bei Gebrauch von Wechselströmen elektrische Energie von hoher und daher lebensgefährlicher Spannung, aber geringer Stromstärke ohne beträchtliche Verluste in Wechselstrom von niedriger Spannung und grosser Stromstärke durch Transformatoren umgesetzt werden, die keinerlei bewegte Teile haben, während Gleichstrom nur durch Apparate transformiert werden kann, die, wie gewöhnliche Dynamomaschinen, rotierende Anker haben und daher der Beaufsichtigung und Schmierung bedürfen.

Auch bei den besten Gleichstrommaschinen, mögen sie als Stromerzeuger oder als Elektromotoren thätig sein, zeigen sich an den Stellen, an welchen die Stromabnehmer, die sogenannten Bürsten, den Kollektor berühren, kleine Funken; in feuergefährlicher Umgebung können daher solche Maschinen nicht verwendet werden. Wechselstrommaschinen und -motoren können dagegen so konstruiert werden, dass an ihnen keine Stelle vorhanden ist, an welcher Funkenbildung stattfindet; man wird daher solche Apparate auch noch in Pulvermühlen und in Räumen, in welchen entzündliche Gase vorkommen, gebrauchen können.

Während man lange Zeit mit Recht gegen eine ausgedehnte Anwendung von Wechselströmen geltend machte, dass dieselben zur Arbeitsübertragung auf elektrischem Wege minder geeignet seien, weil die älteren Wechselstrommotoren nicht mit Belastung angehen wollten, bei Überlastung stehen blieben, besonderer durch Gleichstrom erzeugter Magnetfelder bedurften, und ihre Umlaufszahl nicht geregelt werden konnte, so sind diese Schwierigkeiten durch neuere Konstruktionen mit umlaufendem Magnetfelde völlig überwunden.

Auch die Gefährlichkeit von Strömen mit hoher Spannung fürchtet man nicht mehr, seitdem man gelernt hat, Wechselströme geringer Spannung zu erzeugen, die man zum Zwecke der Fortleitung auf weite Entfernungen durch verhältnismässig dünne und daher billige Drähte in hochgespannte Ströme umsetzt und dann am Orte ihrer Bestimmung, ehe sie irgendwie verwendet werden, wiederum in ungefährliche Ströme von niedriger Spannung rückwärts umsetzt, ohne dass bei dieser wiederholten Verwandlung sehr grosse Verluste auftreten.

Die einzige Einwendung von Wichtigkeit, die man noch immer mit Recht gegen den Gebrauch von Wechselströmen erheben kann, ist die Thatsache, dass man chemische Prozesse von praktischer Bedeutung nur mit Gleichstrom hervorbringen, daher auch nur mit Gleichstrom Akkumulatoren laden und elektrische Energie aufspeichern kann.

Aber auch nach dieser Richtung hin sind Erfolge von praktischer Bedeutung bereits erreicht worden; es ist gelungen, Vorrichtungen zu konstruieren (Gleichrichter genannt), die den Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln gestatten, ohne dass bei dieser Umsetzung zu grosse Verluste entstehen.

3. Summation von Wechselströmen und periodisch veränderlichen Spannungen.

Ganz in derselben Weise wie man in der Wellenlehre Wellen zusammensetzen lernt, können auch zwei oder mehrere Wechselströme, die gleichzeitig durch einen Leiter fliessen, vereinigt werden.

Denken wir uns z. B., dass wir auf einer geraden Linie die Zeiten als Abscissen und senkrecht dazu die zu den verschiedenen Zeiten stattfindenden Stromstärken oder die Spannungen eines Wechselstromes als Ordinaten auftragen, so erhalten wir als Bild der periodischen Veränderungen eine Wellenlinie, wie sie in Fig. 2 mit I bezeichnet ist.

Wird nun in demselben Leiter gleichzeitig ein zweiter Wechselstrom oder eine zweite periodisch veränderliche Spannung erzeugt, so wird diese durch eine zweite Wellenlinie II graphisch dargestellt.

Die beiden Wellenlinien können nun, indem man gleichgerichtete Ordinaten addiert, entgegengerichtete Ordinaten von einander subtrahiert, zu einer einzigen neuen Wellenlinie III vereinigt werden.

Wenn, wie in der vorliegenden Abbildung, beide Wellenlinien eine

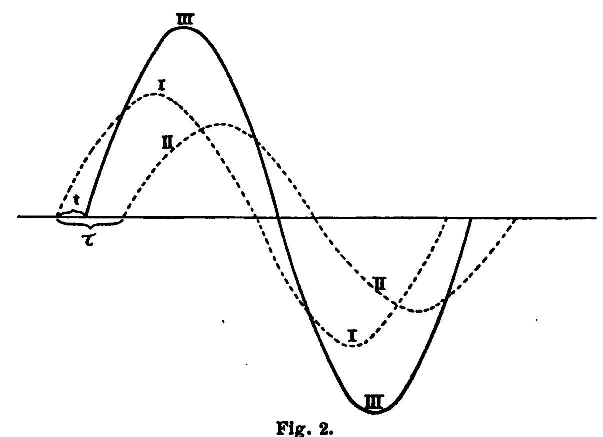


Fig. 2.
Summation zweier periodischer Änderungen von gleicher Periode und verschiedener Phase.

gleiche Periode besitzen, so ist auch der neu entstehende Wellenzug III wiederum eine Sinuslinie. Wird z. B. die Wellenlinie I durch die Formel

$$i' = J' \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

und die zweite Wellenlinie II durch die Formel

$$i' = J'' \cdot \sin 2\pi \frac{t - \tau}{T}$$

dargestellt, wobei J′ und J″ die Abstände der beiden Wellenscheitel von der Abscissenachse und τ die Zeit bezeichnet, um welche die Wellenlinie II später als I ihren positiven Höchstwert erreicht, so ergiebt sich durch algebraische Addition:

$$i''' = i' + i'' = J' \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} + J'' \cdot \sin 2\pi \frac{t - \tau}{T}.$$

Es ist dann [1])

$$i''' = J''' \cdot \sin 2\pi \cdot \frac{t - t}{T}$$

wenn man abkürzungsweise mit J''' die Scheitelhöhe der neu entstandenen Welle III und mit t die Zeit bezeichnet, um welche die Welle III später die höchste Höhe erreicht, als die Welle I.

---

[1]) Der Beweis liegt in der folgenden einfachen Entwickelung.
Wir setzen in:

$$i''' = J' \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} + J'' \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{\tau}{T}\right)$$

$$2\pi \cdot \frac{t}{T} = \omega t \text{ und } 2\pi \frac{\tau}{T} = \psi$$

und entwickeln im zweiten Gliede $\sin(\omega t - \psi) = \sin \omega t \cos \psi - \cos \omega t \sin \psi$.
Dann ist:

$$i''' = (J' + J'' \cos \psi) \sin \omega t - J'' \cdot \sin \psi \cos \omega t.$$

Nunmehr dividieren und multiplizieren wir die rechte Seite der Gleichung mit

$$\sqrt{(J' + J'' \cdot \cos \psi)^2 + (J'' \cdot \sin \psi)^2} = \sqrt{J'^2 + J''^2 + 2 J' \cdot J'' \cdot \cos \psi} = J'''.$$

So erhält man:

$$i''' = J''' \cdot \left\{\frac{J' + J'' \cos \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cdot \cos\psi)^2 + (J'' \cdot \sin\psi)^2}} \cdot \sin \omega t - \frac{J'' \cdot \sin \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cdot \cos\psi)^2 + (J'' \cdot \sin\psi)^2}} \cdot \cos \omega t\right\}$$

Setzt man jetzt:

$$\tan \varphi = \frac{J'' \cdot \sin \psi}{J' + J'' \cdot \cos \psi}$$

so ist

$$\sin \varphi = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} = \frac{\frac{J'' \cdot \sin \psi}{J' + J'' \cos \psi}}{\sqrt{\frac{(J'' \cdot \sin \psi)^2 + (J' + J'' \cos \psi)^2}{(J' + J'' \cdot \cos \psi)^2}}} = \frac{J'' \sin \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cdot \cos\psi)^2 + (J'' \cdot \sin\psi)^2}}$$

und

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} = \frac{J' + J'' \cdot \cos \psi}{\sqrt{(J' + J'' \cos \psi)^2 + (J'' \cdot \sin \psi)^2}}$$

Demnach wird:

$$i''' = J''' \cdot \left\{\cos \varphi \cdot \sin \omega t - \sin \varphi \cdot \cos \omega t\right\}$$

oder

$$i''' = J''' \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

und wenn man für ωt und φ die Werte wieder einsetzt:

$$i''' = J''' \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \text{arc tan} \frac{J'' \cdot \sin \psi}{J' + J'' \cdot \cos \psi}\right)$$

Wenn man nun $\quad \text{arc tan} \frac{J'' \sin \psi}{J' + J'' \cdot \cos \psi} = \frac{2\pi}{T} t$

setzt, erhält man die gewünschte Formel:

$$i''' = J''' \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (t - t)$$

Der Unterschied der Abscisse für die positiven Höchstwerte der drei Wellenlinien I, II, III heisst der Phasenunterschied. Derselbe ist zwischen I und III gleich t, zwischen I und II gleich τ und zwischen III und II gleich $\tau - t$.

Dieser Phasenunterschied kann sowohl in Zeit, als in Bruchteilen einer Wellenlänge, oder endlich in Winkelgraden, oder in Bogen für den Radius 1 ausgedrückt werden, wenn man die Länge einer Welle gleich 360^0 oder gleich 2π setzt. Da die Welle I zuerst ihr positives Maximum erreicht, sagt man, III und II seien gegen I in der Phase verzögert. In diesem Falle rechnet man den Phasen-Unterschied positiv.

Wenn aber Welle III früher ihr positives Maximum erreicht als die Welle II, so sagt man, III sei gegen II in der Phase verfrüht, oder III besitze im Vergleich mit II eine Phasenvoreilung oder eine negative Phasendifferenz.

Man erkennt, dass durch Summation der beiden Sinuslinien (I und II) von gleicher Periode wiederum eine Sinuslinie (III) entsteht, deren Wellenhöhe aber sowohl als deren Phase von der der beiden Komponenten wesentlich abweicht; in der Periode oder der Wellenlänge stimmt jedoch auch die Wellenlinie III mit I und II überein.

4. Andere graphische Darstellung periodisch veränderlicher Grössen.

Statt die periodischen Veränderungen eines Wechselstromes oder der diesen Strom veranlassenden E M K durch eine Wellenlinie dar-

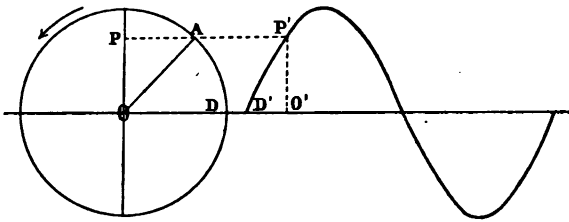


Fig. 3. Darstellung eines periodisch veränderlichen Vorganges durch ein Vektordiagramm.

zustellen, kann man auch eine andere einfachere Art der graphischen Darstellung wählen.

Schlagen wir um den Punkt O (vgl. Fig. 3) einen Kreis mit einem Radius gleich der Entfernung des Gipfels des Wellenberges von der horizontalen Linie, die die Zeit darstellt, und ziehen einen Radius, z. B. O A = J, so verändert sich die Projektion O P dieses Radius auf einen vertikalen Durchmesser genau in derselben Weise periodisch,

wie die harmonisch veränderliche Grösse i,

$$i = J \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

wenn man den Radius in der Zeit T, der Dauer einer Periode, je einmal eine volle Umdrehung mit gleichförmiger Geschwindigkeit (entgegen der Richtung des Uhrzeigers) vollführen lässt und wenn im Punkte D die Bewegung in dem Augenblicke beginnt, in dem der Wechselstrom oder die Wechselspannung in D′ anfängt.

Die Vertikalprojektion von $\overline{OA}$, d. i. die Strecke O P, ist gleich der Ordinate O′P′ der Sinuskurve und ändert sich wie diese.

Man erkennt sofort, dass:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

die **Winkelgeschwindigkeit** ist, mit der der Radius rotiert. Wie bei

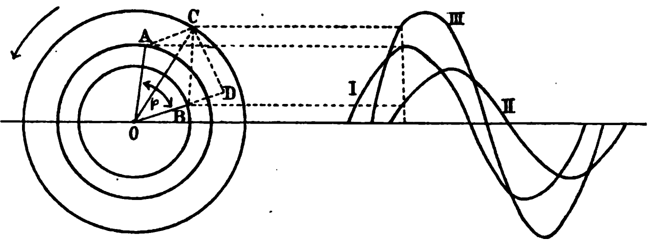


Fig. 4. Summation zweier periodisch veränderlicher Grössen von gleicher Periode durch Vektordiagramm.

der Wellenlinie ist t die Zeit, die vom Anfange der Bewegung oder vom Nullwerte an verflossen ist.

Man kann daher eine wie ein Sinus veränderliche Grösse oder, was dasselbe ist, eine **harmonisch veränderliche** Grösse in ihrem zur Zeit t stattfindenden Werte auch durch den Radius OA (auch Vektor genannt) und einen darüber gezeichneten Pfeil, der die Bewegungsrichtung andeutet,[1]) darstellen. Diese Art der Darstellung führt den Namen »**Vektordiagramm**«.

5. Die Summation gleichartiger periodischer Veränderungen von gleicher Periode durch Vektordiagramm.

Für einen beliebigen Zeitpunkt t werden zwei zu summierende periodische Änderungen I und II von gleicher Periode durch die augenblickliche Stellung zweier von einem Punkte O ausgehender Vektoren O A und O B veranschaulicht, deren Vertikalprojektion den

---

[1]) Welche Drehrichtung man wählt, ist ganz gleichgiltig.

Schwingungszustand darstellt. (Vergl. Fig. 4.) Von der Grösse des Winkels

$$BOA = \omega t - \psi = \varphi$$

hängt alsdann der Unterschied im Schwingungszustand der beiden Bewegungen ab; dieser Winkel φ giebt den **Phasenunterschied** der beiden periodischen Änderungen I und II an.

Setzt man nun die beiden Vektoren $\overline{OA}$ und $\overline{OB}$ in derselben Weise zu einer Resultante O C zusammen, wie dies bei dem Parallelogramm der Kräfte und der Bewegungen üblich ist, so giebt $\overline{OC}$ nach Grösse und Lage genau den Vektor, durch dessen Vertikalprojektion zu jeder Zeit die Summe der beiden periodischen Änderungen I und II dargestellt wird.

Es ist

$$\overline{OC} = \sqrt{\overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 + 2\,\overline{OA} \cdot \overline{OB} \cdot \cos\varphi}$$

und ebenso ergiebt sich aus der Figur:

$$\tan COB = \tan\Theta = \frac{\overline{CD}}{\overline{DO}} = \frac{\overline{OA} \cdot \sin\varphi}{\overline{OB} + \overline{OA}\cos\varphi}$$

Man erkennt sofort, dass wenn man mit $\overline{OA}$ die Grösse J', mit $\overline{OB}$ die Grösse J'' und mit φ den Phasenunterschied der beiden zu summierenden Wechselströme bezeichnet, $\overline{OC}$ den Höchstwert des durch die Addition entstandenen Wechselstromes III, d. h. die Grösse J''' und Θ den Phasenunterschied des Stromes III und II darstellt.

Man erhält auf dem Wege der Konstruktion somit auf viel einfachere Weise dieselben Resultate, die sich in Absatz 3 auf dem Wege der Rechnung ergeben hatten. Für die Lösung praktischer Aufgaben wird man sich daher immer mit Vorteil des graphischen Verfahrens, d. h. der Vektordiagramme bedienen.

6. Zusammensetzung mehrerer sich periodisch ändernder Grössen von gleicher Periode.

In derselben Weise, wie man zwei periodisch veränderliche Erscheinungen zu einer einzigen vereinigen kann, können auch eine grössere Anzahl summiert werden, sofern nur alle dieselbe Periode haben.

Man bildet zunächst aus zweien die Resultante, dann aus dieser Resultante und einer dritten eine Resultante; diese neue Resultante vereinigt man nach dem Parallelogramm der Bewegungen mit einer vierten und fährt so fort, bis alle periodischen Veränderungen in einem einzigen Vektor vereinigt sind.

In der Fig. 5 sind beispielsweise vier periodische Änderungen $\overline{OA}$, $\overline{OB}$, $\overline{OC}$ und $\overline{OD}$ nach ihrer Grösse und nach ihrem Phasenunterschied aufgezeichnet; dann wird in der oben angegebenen Weise zunächst aus $\overline{OA}$ und $\overline{OB}$ die Resultante $\overline{OM}$ gebildet; diese Resultante ist mit $\overline{OC}$ zu einer neuen $\overline{ON}$ und endlich diese neue mit $\overline{OD}$ zur Gesamtresultante $\overline{OR}$ vereinigt worden.

Dieselbe Konstruktion lässt sich auch einfacher ausführen (vgl. Fig. 6), wenn man an das Ende von $\overline{OA}$ eine $\overline{OB}$ gleiche und parallel gerichtete Strecke anträgt, an den nun erhaltenen Endpunkt eine Strecke, die $\overline{OC}$ gleich ist und dieselbe Richtung wie diese besitzt; an den so

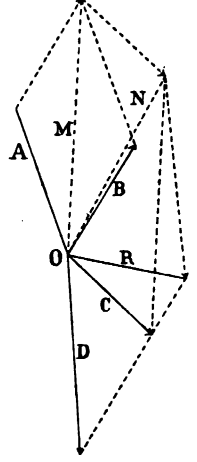


Fig. 5. Zusammensetzung mehrerer veränderlicher Grössen von gleicher Periode.

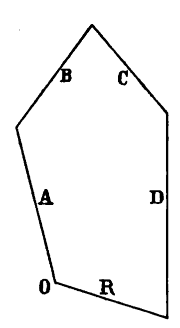


Fig. 6. Andere Art der Zusammensetzung mehrerer erforderlicher Grössen.

erhaltenen Punkt fügt man alsdann nach Grösse und Richtung $\overline{OD}$, so ist die Verbindung des zuletzt erhaltenen Punktes mit O nach Grösse und Richtung gleich dem Vektor O R, der resultierenden, periodisch veränderlichen Grösse.

Dieses Verfahren kann auf beliebig viele Vektoren angewendet werden, und für das Endresultat ist es ganz gleichgiltig, in welcher Reihenfolge die verschiedenen Komponenten zusammengesetzt werden.

Wir machen zum Schluss noch einmal darauf aufmerksam, dass diesen Methoden zwei Voraussetzungen zu Grunde liegen: Die zu summierenden periodischen Änderungen müssen gleiche Perioden haben, und die Änderung muss nach dem einfachen Sinusgesetz stattfinden. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so kann dieses Verfahren sowohl zur Zusammensetzung von periodisch veränderlichen elektromotorischen Kräften als zur Zusammensetzung von Wechselströmen und periodisch veränderlichen Kraftlinienfeldern verwendet werden.

Diese Konstruktionen können somit auf alle periodisch veränderlichen Grössen von gleicher Periode angewendet werden, und wir werden weiterhin auf diese Weise sowohl E M Kräfte, Wechselströme, als auch periodisch veränderliche Kraftlinienfelder zusammensetzen.

Für jeden, der aus den ersten Elementen der Mechanik mit dem Parallelogramm der Wege, der Geschwindigkeiten, der Kräfte bekannt ist, bedarf es kaum der Erwähnung, dass man ebenso periodisch veränderliche E M Kräfte, Ströme und Kraftlinienfelder in Komponenten zerlegen kann. Auch von diesen Zerlegungen wird in den folgenden Darlegungen öfters Gebrauch gemacht werden.

7. Die Mittelwerte periodisch veränderlicher Erscheinungen.

Da bei den in der Praxis vorkommenden Wechselströmen die Änderung der E M K sowohl als der Stromstärken und der erzeugten Kraftlinienfelder sehr rasch vor sich geht, sind wir im allgemeinen nicht imstande, die in jedem Augenblick auftretenden Werte durch die Beobachtung wahrzunehmen. Wir müssen uns daher mit Durchschnittswerten begnügen.

Wollte man bei einer nach einer Sinusfunktion sich ändernden Erscheinung den Durchschnittswert für eine ganze Periode, also einen Wellenberg und ein Wellenthal, aufsuchen, so müsste dieser Durchschnittswert gleich Null sein, da gleich viel positive und negative Werte in den beiden kongruenten Hälften einer ganzen Welle auftreten. Wir messen nun die Spannung oder Stromstärke von Wechselströmen entweder durch die Wärmeentwickelung, welche ein Wechselstrom hervorbringt, oder wir bedienen uns des Elektrodynamometers. In beiden Fällen hängt die gemessene Wirkung nicht von der veränderlichen Grösse selbst, sondern von dem Quadrate derselben ab. (Vergl. Grundzüge der Elektrotechnik VI, 2., S. 10, und X, 4., e, S. 154.)

Die Wärmewirkung eines Stromes ist bekanntlich nach dem Jouleschen Gesetz dem Quadrate der Stromstärke proportional, und ebenso ist die abstossende oder anziehende Kraft, welche die feste Windung eines Elektrodynamometers auf die von demselben zu messenden Strome durchflossene bewegliche Windung ausübt, dem Quadrate der Stromstärke proportional.

Wir verstehen daher unter effektiver Stärke eines zu messenden Wechselstromes denjenigen quadratischen Mittelwert, der auf ein Hitzdrahtvoltmeter oder ein Elektrodynamometer dieselbe Wirkung, denselben Effekt hervorbringt, wie ein Gleichstrom von einer bestimmten Spannung oder einer bestimmten Stromstärke.

Wir wollen die Grösse dieses quadratischen Mittelwertes einer

nach einer Sinusfunktion veränderlichen elektrischen Erscheinung jetzt zu bestimmen suchen.

Betrachten wir zu irgend einem Zeitpunkte t z. B. die Stärke eines Wechselstromes, so ist dieser Strom

$$i = J \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

wenn wir mit J den Höchstwert und mit T die Zeitdauer einer vollen Periode bezeichnen,[1]) und das Quadrat dieser Ordinate der Wellenlinie ist

$$i^2 = J^2 \cdot \sin^2 2\pi \frac{t}{T}.$$

Betrachten wir nun denselben Strom noch ein zweites Mal, zu einem Zeitpunkte, der um ein Viertel der Zeitdauer einer vollen Periode, also um den Zeitwert $\frac{T}{4}$, zurück liegt, also die Stromstärke zur Zeit $t - \frac{T}{4}$, so ist diese Stromstärke i_1

$$i_1 = J \,.\, \sin 2\pi \frac{t - \frac{T}{4}}{T} = J \,.\, \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{\pi}{2}\right) = -J \,.\, \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

und ihr Quadrat ist

$$i_1^2 = J^2 \cdot \cos^2 2\pi \frac{t}{T} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Die Summe dieser beiden Quadrate ist:

$$i^2 + i_1^2 = J^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Die Summe der Quadrate der beiden um eine Viertelperiode von einander verschiedenen Ströme ist also stets gleich gross, nämlich gleich J^2. Demnach muss auch der Mittelwert dieser Summe, über die Dauer einer vollen Periode genommen, ebenfalls gleich J^2 sein.

Wenn wir diese Summe für alle Punktpaare innerhalb der ganzen Dauer einer vollen Periode T gebildet haben, so haben wir auf der linken Seite die Summe der Quadrate aller innerhalb einer vollen Periode stattfindenden Stromstärken zweimal gebildet, weil innerhalb einer ganzen Periode sowohl i als i_1 alle möglichen Werte durchlaufen hat. Nennen wir also diesen quadratischen Mittelwert i_{eff}, so ist i^2_{eff} gleich dem halben quadratischen Mittelwert der Stromstärke i, und folglich $2 \cdot i^2_{eff} = J^2$

[1]) Mit grossen Buchstaben J, E bezeichnen wir im allgemeinen die Höchstwerte der Stromstärke oder E M K, die in einer vollen Periode vorkommen, mit i und e, die zu einem bestimmten Zeitpunkte t auftretenden Momentanwerte und mit i_{eff} und e_{eff} die effektiven Mittelwerte der Stromstärke und der E M K eines Wechselstromes.

$$i_{eff} = \frac{J}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ J \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Die effektive Stromstärke eines Wechselstromes ist also nur nahe zu $^7/_{10}$ von dem Höchstwert, den der Strom während seiner Änderung erreicht.

Ebenso ist die effektive Spannung, die durch ein Hitzdrahtvoltmeter gemessen wird,

$$e_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ E \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

Haben wir es mit einem nach einer Sinusfunktion periodisch veränderlichen Kraftlinienfeld zu thun, dessen Maximalwert Φ_{max} ist, so wird das effektive Feld

$$\Phi = 0{,}707\ \Phi_{max} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

8. Bestimmungen der effektiven Arbeit eines Wechselstromes.

Wir haben früher gezeigt, dass bei einem Gleichstrome die Arbeitsleistung in der Zeiteinheit gleich dem Produkte aus der Stromstärke i und der Spannung e, also gleich dem Werte i×e ist. Wenn nun, wie dies in der Praxis fast stets der Fall ist, die beiden Wellenlinien, von denen die eine die Stromstärke, die andere die gleichzeitige E M K darstellt, nicht zu gleicher Zeit ihre Gipfel erreichen und nicht gleichzeitig durch Null hindurch gehen, wenn also Stromstärke und E M K zwar gleiche Periode haben, aber zwischen ihnen eine Phasendifferenz besteht, so ist die Bestimmung des effektiven Mittelwertes dieses veränderlichen Produktes zweier periodisch veränderlicher Grössen i und e nur auf Grund besonderer Betrachtungen möglich.

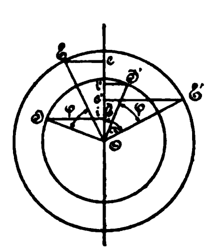


Fig. 7. Ermittelung der Arbeit eines Wechselstromes.

Wir stellen uns die periodisch nach einer Sinusfunktion veränderliche EMK e durch einen von O ausgehenden Vektor O E dar, dessen Länge in irgend einer Masseinheit gleich der höchsten Zahl der Volt, gleich E, ist, die von der Spannung dann erreicht wird, wenn die Wellenlinie der Spannung ihren Wellengipfel erreicht. Ebenso stellen wir in einem anderen passenden Massstab die veränderliche Stromstärke ebenfalls durch einen von O ausgehenden Vektor O J dar. Den Winkel φ, den O J und O E mit einander einschliessen, wählen wir so, dass er gerade der Phasendifferenz entspricht, welche die Welle, die den Verlauf des Stromes darstellt, gegen die Welle der E M K aufweist. (Vergl. Fig. 7.)

Die Projektion des Vektors O J auf die vertikale Y-Achse stellt dann die augenblickliche Stromstärke i

$$i = \overline{OJ} \cdot \sin \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

dar, und die Projektion des Vektors O E auf dieselbe Achse ist die gleichzeitig stattfindende Spannung e

$$e = \overline{OE} \cdot \sin \beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Um den effektiven mittleren Wert der Arbeit A, des Produktes

$$e \cdot i = \overline{OE} \cdot \sin \beta \cdot \overline{OJ} \cdot \sin \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

innerhalb einer vollen Periode zu finden, wenden wir denselben Kunstgriff an, der uns im vorigen Paragraphen zum Ziele geführt hat.

Wir betrachten nämlich ausserdem die Werte der Stromstärke, der Spannung und der elektrischen Arbeit, die eine Viertelperiode später stattfinden. Da eine ganze Periode einer vollen Umdrehung jedes der beiden Vektoren entspricht, so stehen der Vektor $\overline{OJ'}$ auf $\overline{OJ}$ und ebenso der Vektor $\overline{OE'}$ auf $\overline{OE}$ senkrecht. Zu diesem eine Viertelperiode später liegenden Zeitpunkte ist die Stromstärke i'

$$i' = \overline{OJ'} \cdot \sin (\alpha + 90) = \overline{OJ} \cdot \cos \alpha \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

und der gleichzeitige Wert der Spannung e' ist:

$$e' = \overline{OE'} \cdot \sin (\beta + 90) = \overline{OE} \cdot \cos \beta \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Der Momentanwert a der elektrischen Arbeit in diesem Augenblicke ist:

$$a = i' \cdot e' = \overline{OJ} \cdot \cos \alpha \cdot \overline{OE} \cdot \cos \beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Bilden wir jetzt die Summe der Arbeiten, die zu den beiden um eine Viertelperiode verschiedenen Zeitmomenten stattfinden, so ist dieselbe:

$$i \cdot e + i' \cdot e' = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + \overline{OJ} \,.\, \overline{OE} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta =$$

$$\overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \{\sin \alpha \,.\, \sin \beta + \cos \alpha \,.\, \cos \beta\} = \overline{OJ} \,.\, \overline{OE} \,.\, \cos (\alpha - \beta) \quad 13)$$

Da nun aber

$$\alpha - \beta = \varphi$$

die Phasendifferenz zwischen der Stromwelle und der Spannungswelle ist, so erhalten wir:

$$i \cdot e + i' \cdot e' = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \cos \varphi$$

Die rechte Seite dieser Gleichung ist unveränderlich. Bilden wir nun den Mittelwert der Summe über eine volle Periode, so erhalten wir links den doppelten Betrag des Mittelwertes a_{eff} der Arbeitsleistung für eine volle Periode und finden, dass derselbe dem unveränderlichen Werte der rechten Seite gleich ist,

$$2\, a_{eff} = \overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \cos \varphi$$

oder

$$a_{eff} = \frac{\overline{OJ} \cdot \overline{OE} \cdot \cos \varphi}{2} = \frac{\overline{OJ}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\overline{OE}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi$$

Da nun aber $\frac{OJ}{\sqrt{2}} = i_{eff}$ der effektive oder quadratische Mittelwert der Stromstärke, und $\frac{\overline{OE}}{\sqrt{2}} = e_{eff}$ derselbe Mittelwert der periodisch veränderlichen E M K oder Spannung ist, so ergiebt sich schliesslich, dass der Mittelwert der Arbeitsleistung eines Wechselstromes

$$a_{eff} = i_{eff} \cdot e_{eff} \cdot \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

ist.

Die mittlere Arbeitsleistung eines Wechselstromes ist somit gleich dem Produkte aus der effektiven Stromstärke, der effektiven Spannung

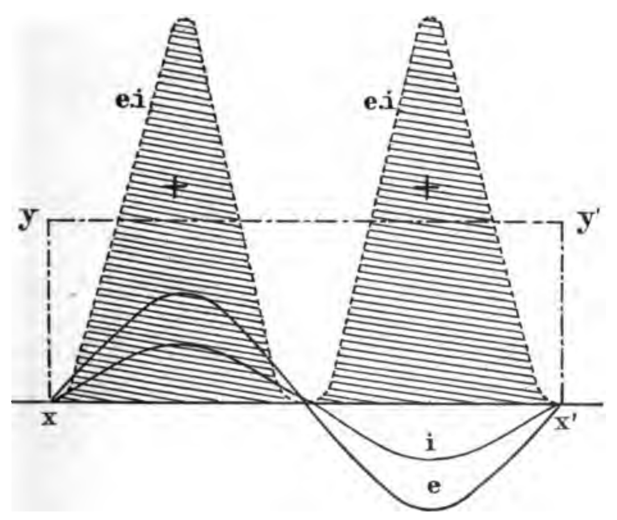


Fig. 8. Arbeit eines Wechselstromes, dessen Stromstärke und Spannung gleiche Phase haben.

und dem Cosinus der Phasendifferenz der Stromwelle und der Spannungswelle.

Der Faktor cos φ, mit dem das Produkt aus der effektiven Spannung und der effektiven Stromstärke eines Wechselstromes multipliziert werden muss, um die effektive Arbeit dieses Stromes oder eines Wechselstromapparates zu erhalten, nennt man den »Leistungsfaktor«.

In vorstehender Figur 8 sind beispielsweise die Stromwelle (i), die Spannungswelle (e) und der Verlauf der Arbeitsgrössen (i · e) während der Dauer einer Periode graphisch dargestellt, und zwar in dem speziellen Falle, dass zwischen dem Strom und der E M K des

Wechselstromes keine Phasendifferenz vorliegt, dass der Phasenverschiebungswinkel φ also den Wert Null hat.

Der Flächeninhalt der schraffierten Kurve, deren einzelne Ordinaten für jeden Moment die Grösse der Arbeit e . i angeben, ist die effektive

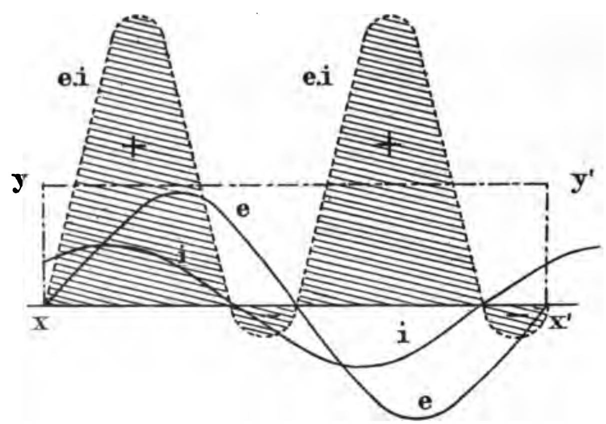


Fig. 9. Arbeit eines Wechselstromes, wenn der Strom gegen die Spannung um 45° in der Phase voreilt.

Arbeit, die während einer vollen Periode geleistet wird. Das Rechteck x y y' x' stellt diesen Arbeitswert ebenfalls dar.

Man sieht, dass im Verlaufe einer vollen Periode die Arbeit ver-

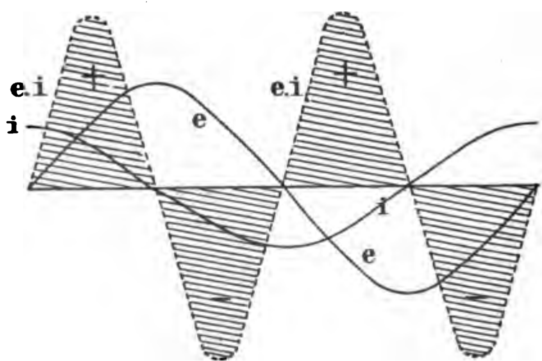


Fig. 10. Arbeit eines Wechselstromes, bei dem der Strom gegen die Spannung um 90° voreilt.

änderlich ist und im vorliegenden Falle aus zwei Wellen besteht, die sich in positiver Richtung über die Abscissenachse erheben.

Bei einem Strome, bei dem E M K und Stromstärke in gleicher Phase sind, wird somit nur positive Arbeit geleistet.

Anders ist es bei dem in Fig. 9 aufgezeichneten Beispiele. Hier ist die dicker gezeichnete Stromkurve in der Phase verfrüht gegen die E M K (und zwar ist $\varphi = -45^0$). Die E M K erreicht z. B. ihren Höchstwert E zu einem Zeitpunkte, zu dem der Wert i bereits erheblich unter seinen Maximalwert gesunken ist. In diesem Falle besteht die durch die schraffierte Fläche dargestellte Arbeit aus vier Teilen, von denen zwei mit + bezeichnete über der Abscissenachse, zwei mit — bezeichnete unter der Abscissenachse liegen. Die effektive Arbeit, deren Betrag wieder durch das Rechteck x y y' x' dargestellt wird, ist dann die Differenz der über und der unter der Linie x x' liegenden Flächenstücke.

Besonders bemerkenswert ist der Umstand, dass für den besonderen Fall $\varphi = 90^0$ der Wechselstrom gar keine Arbeitsleistung besitzt. Dies tritt ein, wenn die Spannung und die Stromstärke einen Phasenunterschied von 90^0, d. h. von einer Viertelwellenlänge haben. Man spricht dann von einem »wattlosen Strome«.

Die Fig. 10 stellt diesen Fall dar. Der Strom ist gegen die E M K um eine volle Viertelperiode verfrüht. Man ersieht aus der Figur, dass dann die Arbeit aus vier kongruenten Teilen besteht, von denen zwei über, zwei unter der Abscissenachse liegen. Die algebraische Summe dieser Grössen ist alsdann gleich Null.

Ein solcher wattloser Strom würde z. B. theoretisch der Erregerstrom eines mit Selbstinduktion behafteten Apparates sein, weil er gegenüber der induzierenden E M K eine Phasenverschiebung von 90^0 besitzt. Thatsächlich ist aber doch ein gewisser Energieaufwand nötig, weil in jeder derartigen Einrichtung Verluste im Eisen durch Hysteresis und Verluste im Leitungsmaterial durch entstehende Wirbelströme unvermeidlich sind.

2. Kapitel.

Wechselstromkreise mit Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität.

1. Wechselstrom in einem Stromkreise mit Selbstinduktion.

Denken wir uns der Einfachheit wegen einen Stromkreis, der aus einer Stromquelle besteht, die einen Wechselstrom erzeugt; dieser Wechselstrom fliesse durch einen von Selbstinduktion freien Widerstand, z. B. eine Anzahl von Glühlampen, und hierauf durch eine Vorrichtung, deren Widerstand vernachlässigt werden kann, die aber eine erhebliche Selbstinduktion besitzt, etwa durch die Windungen eines Elektromagneten.

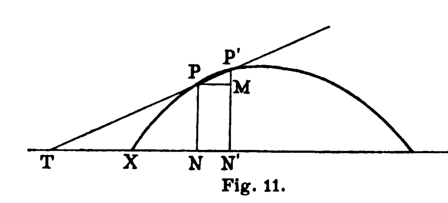


Fig. 11.

Den gesamten Widerstand des Stromkreises, der sich geltend machen würde, wenn derselbe von einem Gleichstrom durchflossen würde, bezeichnen wir mit w.

Dadurch, dass der Wechselstrom die Spule des Elektromagneten durchfliesst, werden in dem Eisenkern der Spule Kraftlinien erzeugt; jede Änderung der Kraftlinienzahl erzeugt aber infolge der Induktionswirkung eine EMK, die genau der Änderung der Kraftlinienzahl, bezogen auf die Zeiteinheit, gleich ist.[1]) Nehmen wir z. B. an, die Anzahl der vom Wechselstrom erzeugten Kraftlinien zu verschiedenen Zeiten werde durch die Wellenlinie (Fig. 11) dargestellt, alsdann wird die Änderung der Kraftlinienzahl, bezogen auf die Zeiteinheit, ausgedrückt durch die trigonometrische Tangente des Winkels, den die Tangente an die Kurve mit der Abscissenachse oder der Linie macht, auf die wir die Zeiten abgetragen haben. Während die Zeit von N bis N' um den kleinen Betrag $\overline{NN'} = \varDelta$ wächst, nimmt die

[1]) Man vergl. Grundzüge der Elektrotechnik, Kap. VII, S. 106 u. s. f.

Anzahl der Kraftlinien um MP′ zu. Die gesuchte, auf die Zeiteinheit bezogene Änderung der Kraftlinienzahl, die gleich der durch diese Änderung hervorgerufenen EMK e_s ist, findet sich aus der Proportion:

$$\Delta : 1 = \overline{MP'} : e_s$$

oder

$$e_s = \frac{\overline{MP'}}{\Delta} = \tan MPP'$$

Liegen sich aber die beiden Punkte P und P′ genügend nahe, so kann ohne merklichen Fehler die geometrische Tangente im Punkte P an die Kurve mit der Sehne PP′ vertauscht werden.

Der Winkel MPP′ erreicht sichtlich seine höchsten Werte, wenn der Punkt P an den Stellen der Kurve gewählt wird, an der die Wellenlinie durch die Nulllinie hindurch geht. Der Winkel MPP′ und somit auch seine trigonometrische Tangente sind dagegen Null, wenn der Punkt P auf einem Gipfel der Welle oder auf der tiefsten Stelle des Wellenthales gewählt wird.

Die Kurve, durch die man die induzierte EMK darstellen kann, ist somit wieder eine Wellenlinie, aber die Gipfel dieser Wellenlinie liegen da, wo die Kurve, durch die wir die Kraftlinienzahl zu verschiedenen Zeiten dargestellt haben, durch Null hindurchgeht, während die abgeleitete Kurve der induzierten EMK zu der Zeit durch Null hindurch geht, zu der die Kraftlinienkurve ihre Wellengipfel oder die tiefsten Stellen der Wellenthäler erreicht.

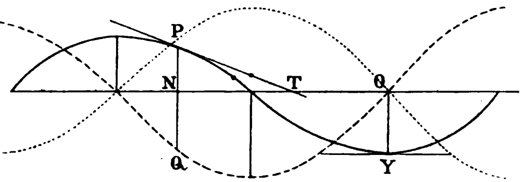


Fig. 12. Gleichzeitige Aenderung der Kraftlinienzahl und der induzierten EMK.

Die Kurven, durch die man die in den Windungen des Elektromagneten induzierten EMK darstellen könnte, besitzen also gegen die Kurven der Kraftlinie eine Phasendifferenz, die einem Unterschiede von einer Viertelwelle oder einer Viertelperiode entsprechen würden.

Da bekanntlich die induzierte EMK in dem Sinne wirkt, dass sie den alten Zustand zu erhalten, also die Änderung zu hindern sucht, so hat sie in jedem Momente ein der Änderung entgegengesetztes Vorzeichen. Die Wellenlinie der induzierten EMK wird daher um eine Viertelwellenlänge oder eine Viertelperiode hinter der Wellenlinie der Kraftlinie zurückbleiben; sie erscheint in der graphischen Darstellung nach rechts um eine Viertelwellenlänge verschoben.

In Fig. 12 stellt die ausgezogene Linie die periodische wechselnde Kraftlinienzahl, die gestrichelte Linie die jeweilige Änderung der Kraftlinienzahl und die punktierte Linie die induzierte EMK als Funktion der Zeit dar.

Da z. B. im Punkte P die Kraftlinienzahl abnimmt, ist der Winkel NTP und somit seine Tangente negativ. Die Ordinate NQ, die den Wert der trigonometrischen Tangente des Winkels NTP darstellt, ist daher nach unten gerichtet. Die gestrichelte Wellenlinie erreicht ihren negativen Maximalwert, wenn die Kraftlinienkurve durch die Abscissenachse hindurchgeht. Die induzierte EMK ist Null (z. B. bei O), wenn (bei Y in der Figur) die Feldstärke ihren höchsten negativen Wert überschreitet.

Es fragt sich nun zunächst, was für eine Kurve die in der Figur ausgezogene Linie sein wird, durch die man die Änderung der Kraftlinienzahl darstellen kann. Die Verschiedenheit der Kraftlinienzahl im Kerne des Elektromagneten hat ihre Ursache in dem Wechselstrome, den wir durch die Windungen senden. Wir wissen aber, dass die von einem die Windungen durchfliessenden Strome im Eisenkerne erzeugte Kraftlinienzahl abhängig ist von der Stromstärke, von der Windungszahl und der Permeabilität des Eisens.[1])

Die in jedem Zeitmomente im Kerne erzeugte Kraftlinienzahl würde der jeweiligen Stromstärke sogar streng proportional sein, wenn die Permeabilität konstant wäre. Dies ist aber bekanntlich nur für sehr geringe Kraftliniendichten (etwa bis 4000 Kraftlinien für 1 *qcm* Querschnitt) bei besonders vorzüglichen Eisensorten annähernd der Fall, für höhere Kraftliniendichten nimmt die Permeabilität bekanntlich ab. (Vergl. Fig. 40, S. 62.)

Die Kurve der Kraftlinienzahl wird daher nicht genau nach denselben Gesetzen sich ändern, wie die nach einer Sinusfunktion veränderliche Stromstärke des Wechselstromes, aber es wird in einer ersten rohen Annäherung gestattet sein, anzunehmen, dass auch die Änderung der Kraftlinienzahl nach einer Sinusfunktion erfolge, da bei Wechselstromapparaten meist nur mit geringen Kraftliniendichten gearbeitet wird, und nur bestes Eisenblech Verwendung findet oder wenigstens benutzt werden soll. Setzen wir also voraus, dass die Änderung der Kraftlinienzahl nach einer Sinusfunktion erfolgt, so ist in Fig. 11

$$\overline{NP} = \Phi \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} = \Phi \cdot \sin \omega t \quad \ldots \quad 1)$$

und

$$\overline{N'P'} = \Phi \cdot \sin 2\pi \frac{t + \varDelta}{T} \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

Somit ist:

$$\overline{MP'} = \overline{N'P'} - \overline{NP} = \Phi \cdot \left\{ \sin 2\pi \frac{t}{T} \cdot \cos 2\pi \frac{\varDelta}{T} + \cos 2\pi \frac{t}{T} \cdot \sin 2\pi \frac{\varDelta}{T} - \sin 2\pi \frac{t}{T} \right\}$$

Unseren Annahmen nach ist nun aber $\varDelta$ eine sehr kleine Grösse,

[1]) Grundzüge, Kap. V, 4., S. 78 u. f.

demnach ist $2\pi\frac{\Delta}{T}$ ein sehr kleiner Winkel. Der Cosinus eines sehr kleinen Winkels kann ohne merklichen Fehler gleich 1 gesetzt, der Sinus eines sehr kleinen Winkels mit dem Winkel selbst vertauscht werden.

Danach ist:

$$MP' = \Phi\left\{\sin 2\pi\frac{t}{T} + 2\pi\frac{\Delta}{T}\cdot\cos 2\pi\frac{t}{T} - \sin 2\pi\frac{t}{T}\right\} =$$

$$\Phi\cdot 2\pi\frac{\Delta}{T}\cdot\cos 2\pi\frac{t}{T} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Hiernach ist:

$$\operatorname{tg} NTP = \frac{\overline{MP'}}{\overline{MP}} = \frac{\Phi\cdot 2\pi\frac{\Delta}{T}\cdot\cos 2\pi\frac{t}{T}}{\Delta} = \Phi\cdot\frac{2\pi}{T}\cdot\cos 2\pi\frac{t}{T} =$$

$$\Phi\cdot\frac{2\pi}{T}\cdot\sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\pi\frac{t}{T}\right) = -\Phi\frac{2\pi}{T}\cdot\sin\left(2\pi\frac{t}{T} - \frac{\pi}{2}\right) \quad \ldots \quad 4)$$

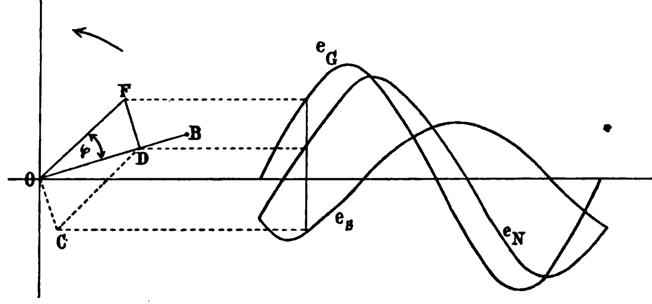


Fig. 13. **Widerstand und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.**

Da nun aber tg N T P die induzierte E M K misst, so erkennt man, dass die durch die Induktion in den Windungen des Elektromagneten erzeugte E M K ebenfalls angenähert als eine Sinusfunktion angesehen werden kann, die zwar die gleiche Periode wie der Strom besitzt, aber um eine Viertelwellenlänge oder, was dasselbe ist, um eine Viertelperiode gegen die Stromkurve verzögert und entgegengesetzt gerichtet ist.

Soll in einem mit Selbstinduktion behafteten Stromkreise ein Wechselstrom von einer bestimmten Spannung (d. h. von einer bestimmten effektiven Stärke), wie sie zum Betriebe von Glühlampen erforderlich ist, erzeugt werden, so muss die Elektrizitätsquelle eine höhere Spannung entwickeln, als zur Überwindung des Widerstandes nötig ist, weil auch die E M K der Selbstinduktion mit überwunden werden muss.

Wir haben bereits gelernt, die nach einem Sinusgesetz veränderlichen periodischen Grössen durch Vektoren darzustellen. Dieses Verfahren wollen wir jetzt auf den vorliegenden Fall anwenden. (Vergl. Fig 13.)

$J = \overline{OB}$ sei der in einem bestimmten Massstabe ausgedrückte Maximalwert des Stromes. Um in dem gesamten Widerstande w einen Strom J hervorzurufen, würde eine Spannung $e_N = J \cdot w$ nötig sein.

Diese Spannung (die Nutzspannung), die mit dem Strome in gleicher Phase ist, tragen wir in einem anderen passenden Massstabe in der Richtung von O B auf; es sei $e_N = J\,w = \overline{OD}$.

Um $90^0 = \frac{\pi}{2}$ in der Bewegungsrichtung der Vektoren zurückbleibend, tragen wir von O aus die Grösse $\overline{OC} = E_s$ den Maximalwert der E M K der Selbstinduktion auf. Die zur Überwindung dieser E M K erforderliche Komponente der Spannung oder der E M K der Elektrizitätsquelle muss diesem Vektor gleich, aber entgegengesetzt gerichtet sein; sie wird daher am Punkte D durch $\overline{DF}$ dargestellt.

Bilden wir nunmehr die Resultante aus $\overline{OD}$ und $\overline{DF}$, so erhalten wir die E M K der Elektrizitätsquelle $\overline{OF} = e_G$, die erforderlich ist, um trotz der im Stromkreise vorhandenen Selbstinduktion den Strom $\overline{OB}$ zu erzeugen.

Wir erkennen sofort, dass diese Spannung der Elektrizitätsquelle E_g um die Phasendifferenz $DOF = \varphi$ dem Strome voreilt, dass der erzeugte Strom infolge der Selbstinduktion um den Winkel φ gegen die Spannung $\overline{OF}$ der Elektrizitätsquelle zurückbleibt.

Die Grösse der von der Selbstinduktion hervorgerufenen E M K hängt einmal ab von einem durch die Zahl der Windungen, durch die Abmessungen und durch die magnetischen Eigenschaften des Eisenkernes bedingten Koëffizienten, dem Selbstinduktionskoëffizienten L, ferner von der Stromstärke J, da ein m mal grösserer Strom auch m mal soviel Kraftlinien erzeugt.[1])

Ausserdem aber ist die induzierte E M K noch proportional der Geschwindigkeit ω, mit der die Kraftlinienzahl in der Zeiteinheit geändert wird. In der Zeit T wird eine volle Umdrehung eines Vektors, also eine Drehung um 2π oder 360^0, stattfinden. Die Geschwindigkeit, mit der die Drehung erfolgt, d. h. die Winkeländerung in der Zeiteinheit ω ist somit:

---

[1]) Insoweit es statthaft ist, die Permeabilität des Eisens, aus dem der Kern besteht, als konstant anzusehen.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \sim \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

wenn man mit $\sim$ die Frequenz, d. i. die Anzahl der vollen Perioden des Wechselstromes innerhalb einer Sekunde, bezeichnet.

Die EMK der Selbstinduktion $\overline{OC} = e_s$ ist hiernach:

$$e_s = L \cdot J \cdot \omega \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Aus der Figur erkennt man sofort, dass:

$$\overline{OF}^2 = \overline{OD}^2 + \overline{DF}^2$$

oder

$$e_N = \sqrt{w^2 J^2 + L^2 J^2 \omega^2} = J \cdot \sqrt{w^2 + L^2 \omega^2} \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

ist.

Hieraus folgt:

$$J = \frac{e_N}{\sqrt{w^2 + L^2 \omega^2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Für Wechselstromkreise mit Selbstinduktion gilt daher nicht mehr das Ohm'sche Gesetz. Bei Wechselstrom gilt dasselbe nur dann, wenn $L = 0$ ist, d. h. wenn keine Selbstinduktion im Stromkreise vorhanden ist. Wenn aber Selbstinduktion vorhanden ist, so wird die Stromstärke um so mehr kleiner, als sie nach dem Ohm'schen Gesetze sein würde, je grösser L und je höher die Frequenz des Stromes, je grösser $\sim$ und damit ω ist.

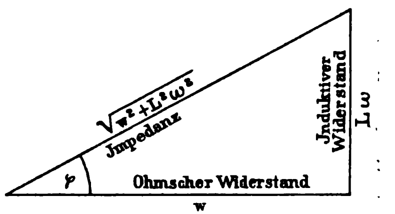


Fig. 14. Zusammensetzung des Ohmschen Widerstandes und der Induktion zur Impedanz.

Die Selbstinduktion aber veranlasst nicht nur eine Verringerung der Stromstärke, sie wirkt nicht bloss wie eine Vergrösserung des Widerstandes, sondern gleichzeitig wird das Auftreten des Stromes zeitlich verzögert.

Man nennt daher die Grösse $\sqrt{w^2 + L^2 \omega^2}$ den **verzögernden Widerstand** oder die **Impedanz** des Wechselstromes.

Die Grösse $L\omega$, das Produkt aus dem Koëffizienten der Selbstinduktion L und der Winkelgeschwindigkeit ω, mit der sich die den Wechselstrom darstellenden Vektoren drehen, führt den Namen induktiver Widerstand oder **Induktanz**.

Man erkennt sofort aus der Form des Ausdruckes für die Impedanz, dass sie sich als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes darstellen lässt, dessen eine Kathete der Ohm'sche Widerstand, dessen andere Kathete die Induktanz ist. (Vergl. Fig. 14.)

Über die Grösse der Phasendifferenz, die Grösse des Winkels φ,

um den der Strom gegen die ihn veranlassende EMK infolge der Selbstinduktion zurückbleibt, giebt die ebenfalls aus der Figur 13 folgende Gleichung Auskunft:

$$\tan\varphi = \tan \mathrm{FOD} = \frac{\overline{\mathrm{FD}}}{\mathrm{OD}} = \frac{\mathrm{L}\omega \mathrm{J}}{\mathrm{w J}} = \frac{\mathrm{L}\omega}{\mathrm{w}} \quad . \; . \; . \quad 9)$$

Man ersieht, dass die Phasenverschiebung des Stromes gegen die EMK um so grösser ausfällt, je grösser die Selbstinduktion im Vergleich zum Widerstande ausfällt; dass sie aber nur dann 90^0 werden könnte, wenn der Widerstand verschwindend im Vergleich zum Betrage der Selbstinduktion wird.

Auch in dem soeben gezeichneten rechtwinkligen Dreieck tritt der Winkel φ, die Phasenverschiebung, auf.

2. Der Selbstinduktionskoëffizient.

Aus den vorhergehenden Betrachtungen ergiebt sich, dass wir unter dem Selbstinduktionskoëffizienten eines Apparates die Anzahl von Kraftlinien verstehen, die ein Strom von der Stärke 1 hervorruft. Dabei müssen wir uns erinnern, dass die Einheit der Stromstärke im absoluten Masssystem 10 mal grösser ist, als das Ampère.

Man erhält also, wie dies auch schon früher (Grundzüge VIII, 6., S. 132) geschehen ist, die Dimension des Selbstinduktionskoëffizienten, wenn man die Dimension des magnetischen Gesamtfeldes[1]) durch die Dimension der Stromstärke[2]) dividiert:

$$\mathrm{Dim\ L} = \frac{[\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\ \mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\ \mathrm{sek}^{-1}]}{[\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\ \mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\ \mathrm{sek}^{-1}]} = [\mathrm{cm}^{1}] \quad . \; . \; . \; . \quad 10)$$

Die Dimension des Selbstinduktionskoëffizienten ist hiernach eine Länge; die absolute Einheit derselben ist das Centimeter.

Da die Einheit des Gesamtfeldes oder die der Spannung (des Volts) gleich 10^8 absolute Einheiten und das Ampère 10^{-1} der absoluten Stromeinheit ist, so ist die praktische Einheit der Selbstinduktion $\frac{10^8}{10^{-1}} = 10^9\,cm$. Diese Grösse: $10^9\,cm$ ist angenähert die Länge des Erdquadranten und führt nach den Beschlüssen des Elektriker-Kongresses in Chicago den Namen Henry.

Bei den meisten theoretischen Betrachtungen wird der Selbstinduktionskoëffizient als eine Konstante des betreffenden Apparates angesehen. Das ist aber nur in ziemlich roher Annäherung richtig. Dieser Koëffizient hängt von der Anzahl der Windungen, von den

---

[1]) Vergl. Grundzüge, Kap. VIII, 4. d), S. 126.
[2]) Vergl. Grundzüge, Kap. VIII, 5. a), S. 127.

Abmessungen des Kernes und von der magnetischen Permeabilität des Materials ab, aus dem der Kern hergestellt ist. Da nun aber für grössere Kraftliniendichte die Permeabilität abnimmt, so ist auch der Koëffizient der Selbstinduktion von der Beanspruchung des Materials abhängig. Man erkennt daraus aufs neue, dass alle Rechnungen, bei denen die oben erwähnte Annahme gemacht wird, nur als ziemlich rohe Annäherung an die Wahrheit betrachtet werden können.

Denken wir uns um einen Eisenkern eine Spule von n Windungen gelegt, und ist der magnetische Widerstand, den die Kraftlinien zu überwinden haben, W, so ist der Selbstinduktionskoëffizient L dieser Spule

$$L = \frac{4\pi n^2}{W} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11)$$

Wäre der Eisenkern ein Ring vom Querschnitt q, und hätte die Permeabilität den Wert μ, hätte endlich der mittlere Weg der Kraftlinien die Länge λ, so wird in diesem besonderen Falle

$$L = \frac{4\pi \cdot n^2 \cdot q \cdot \mu}{\lambda} \quad \ldots \ldots \quad 12)$$

Wäre um denselben Kraftlinienweg vom magnetischen Widerstand W noch eine zweite Spule von n_1 Windungen gelegt, so wäre deren Selbstinduktionskoëffizient: $L_1 = \frac{4\pi n_1^2}{W}$.

Der Koëffizient der gegenseitigen Induktion M wäre:

$$M = \sqrt{L \cdot L_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 13)$$

Diese Bezeichnung gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass keine magnetische Streuung stattfindet, d. h. dass sämtliche Kraftlinien, die durch die eine Spule hindurchgehen, auch von der anderen Spule mit umfasst werden.

Bei Wechselstromapparaten ist diese Voraussetzung stets nur annähernd erfüllt, da eine gewisse magnetische Streuung niemals ganz zu vermeiden ist.

3. Widerstände mit Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

Es ist eine für die Praxis wichtige Frage, zu entscheiden, welche Impedanz mehrere mit Selbstinduktion behaftete Widerstände ausüben, wenn sie hinter einander von demselben Wechselstrome durchflossen werden. Die schon vorher angewendete Konstruktion mit Hilfe der Vektoren bietet auch hier den Weg zur Lösung.

Man zeichnet ein rechtwinkliges Dreieck ABC (vgl. Fig. 15), in dem die Kathete AB der Ohm'sche Widerstand w_1 des ersten mit Selbstinduktion behafteten Apparates ist, und trägt an A die Kathete

$\overline{AC} = \omega L_1$ auf, wobei ω die Winkelgeschwindigkeit des den Strom darstellenden Vektors und L_1 der Selbstinduktionskoëffizient des ersten Apparates ist. Dann ist $\overline{BC}$ die Impedanz des ersten Apparates. An C trägt man dann parallel zu AB den Ohm'schen Widerstand des zweiten Apparates gleich CD auf und errichtet in D dazu die Senkrechte DE, die man gleieh ωL_2 macht. Dann ist $\overline{CE}$ die Impedanz des zweiten Apparates und BE die Impedanz beider Apparate zusammen.

Es bedarf kaum der Erwähnung, dass man dieses Verfahren, in gleicher Weise fortfahrend, auf beliebig viele Apparate mit Selbstinduktion anwenden und die Impedanz eines ganzen, ungeteilten Stromkreises bestimmen kann.

Der Winkel EBA giebt gleichzeitig die Phasenverschiebung, die der Strom gegen die EMK erfährt.

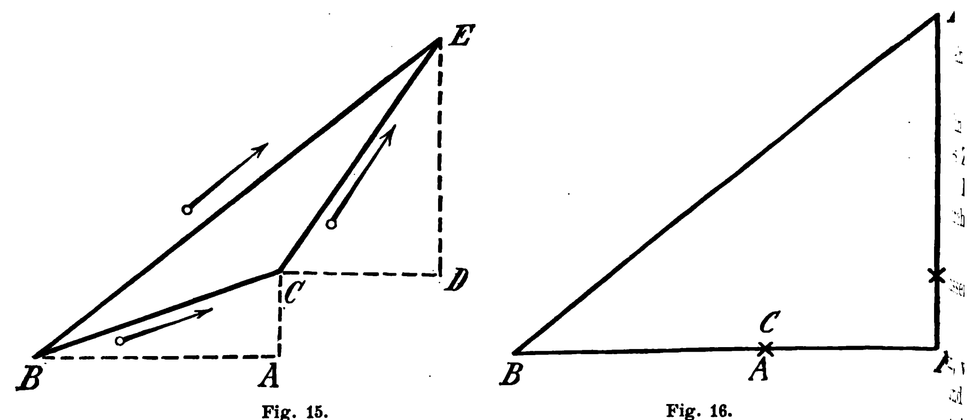


Fig. 15. Fig. 16.

Widerstände mit Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

Ebenso wenig bedarf es eines Beweises, dass man zu demselben Wert von BE nach Grösse und Richtung gelangt, wenn man erst den Widerstand BA, dann in derselben Richtung fortgehend, den Widerstand CD anträgt und am Ende F dieser Strecke eine Senkrechte errichtet, die man gleich $\omega L_1 + \omega L_2 = \overline{AC} + \overline{DE}$ macht. (Vergl. Fig. 16.)

Auch dieses Verfahren lässt sich mehr als zweimal anwenden.

Die Impedanz eines ungeteilten, aus mehreren Vorrichtungen mit Selbstinduktion zusammengesetzten Stromkreises ist daher:

$$x = \sqrt{(w_1 + w_2 + w_3 + \ldots)^2 + \omega^2 (L_1 + L_2 + L_3 + \ldots)^2}.$$

Kommen im Stromkreise Widerstände vor, die keine Selbstinduktion enthalten, hat z. B. w_2 keine Selbstinduktion, so setzt man einfach

den Selbstinduktionskoëffizienten dieses Teiles gleich Null, also in unserem Beispiele würde dann $L_2 = 0$ sein. An der Konstruktion ändert das im Prinzipe nichts.

4. Impedanz parallel geschalteter Widerstände mit Selbstinduktion.

Wir behandeln in diesem Abschnitte den Fall, der bei Gleichstrom den Kirchhoff'schen Gesetzen entspricht. Wir stellen uns vor, am Punkte A komme ein Wechselstrom von der Stärke J an und teile sich dort in zwei parallel geschaltete Zweige. Jeder der Zweige enthalte Widerstände mit Selbstinduktion. Die Stromstärken seien J_1 und J_2, die Widerstände der Zweige w_1 und w_2, die entsprechenden Koëffizienten der Selbstinduktion L_1 und L_2. Im Punkte B herrsche gegen den Punkt A ein Spannungsunterschied E.

Alsdann ist ohne weiteres klar, dass

$$E = J_1 \cdot \sqrt{w_1^2 + \omega^2 L_1^2} = J_2 \cdot \sqrt{w_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

sein muss, d. h. dass die Proportion gilt:

$$J_1 : J_2 = \sqrt{w_2^2 + \omega^2 L_2^2} : \sqrt{w_1^2 + \omega^2 L_1^2} \quad . \quad . \quad 14)$$

Man erkennt, dass die Stromstärke in jedem Zweige der Impedanz des Zweiges umgekehrt proportional ist.

Die Phasenverschiebungen in den beiden Zweigen sind bestimmt durch:

$$\operatorname{tang} \varphi_1 = \frac{L_1 \omega}{w_1} \text{ und } \operatorname{tang} \varphi_2 = \frac{L_2 \omega}{w_2}$$

Ausserdem muss aber auch:

$$E = J \sqrt{w^2 + \omega^2 L^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

sein, wenn wir mit $\sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}$ die gesamte Impedanz der zwischen A und B liegenden, aus zwei parallel geschalteten Apparaten mit Selbstinduktion bestehenden Verzweigung bezeichnen.

Die Phasenverschiebung des resultierenden Stromes würde gleich

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{L\omega}{w} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

sein.

Die Aufgabe, den Strom J zu bestimmen, lässt sich einfacher auf graphischem Wege durch ein Vektorendiagramm erledigen. Den Maximalwert des Spannungsunterschiedes zwischen den Punkten A und B tragen wir in einem passenden Massstabe von einem Punkte O aus auf eine Gerade ab (vergl. Fig. 17), machen also $OA = E$ und schlagen über OA einen Halbkreis.

Dann tragen wir entgegen der durch den Pfeil angedeuteten Drehrichtung dieses Vektors die Verzögerungswinkel der in beiden Zweigen fliessenden Teilströme ab, wir machen also $AOB = \varphi_1$ und $AOC = \varphi_2$.

Dann sind die Sehnen OB und OC die in den Widerständen w_1 und w_2 verbrauchten Spannungen, es sind also die Grössen $\overline{OB} = w_1 \cdot J_1$ und $\overline{OC} = w_2 \cdot J_2$. Dividieren wir also diese Längen durch die Widerstände w_1 und w_2, so erhalten wir die Stromstärken J_1 und J_2 selbst. Diese Grössen $J_1 = \frac{\overline{OB}}{w_1} = OD$ und $J_2 = \frac{\overline{OC}}{w_2} = \overline{OF}$ trägt man in dem für die Stromstärke gewählten Massstabe auf der Linie $\overline{OB}$ beziehentlich $\overline{OC}$ ab. Aus diesen beiden Strecken bildet man die Resultante nach dem Parallelogramm der Ströme und erhält den gesuchten resultierenden Strom, $\overline{OG} = J$.

Der Winkel AOG ist der Winkel, um den der Gesamtstrom J gegen die Gesamtspannung verzögert ist, und man erkennt sofort, dass er zwischen φ_1 und φ_2, den Phasenverzögerungen der Teilströme, gelegen ist.

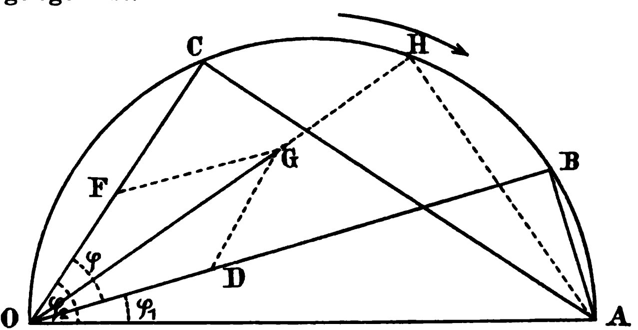


Fig. 17. Widerstände mit Selbstinduktion in Parallelschaltung.

Auch bedarf es kaum des besonderen Hinweises, dass die Grösse i, d. i. die Vertikalprojektion der Maximalstromstärke in den verschiedenen Zeitpunkten, bald grösser, bald kleiner als jeder der beiden Teilströme oder deren Summe sein kann.

In dem Diagramme ist, ganz in der Weise wie wir dies in Abschnitt 1, S. 21, Fig. 13, bereits gezeigt haben, $\overline{OH}$ das Produkt wJ und $\overline{AH}$ die Grösse $J\omega L$. Wenn man diese Grössen aus den erhaltenen Dreiecken auf dem Wege der Rechnung ermittelt, so findet man:

$$w = \frac{Q}{Q^2 + P^2 \cdot \omega^2} \qquad L\omega = \frac{P\omega}{Q^2 + P^2 \cdot \omega^2} \quad \ldots \quad 17)$$

worin:

$$Q = \frac{w_1}{w_1{}^2 + L_1{}^2 \omega^2} + \frac{w_2}{w_2{}^2 + L_2{}^2 \omega_2} \quad \ldots \quad 18)$$

$$P = \frac{L_1 \omega}{w_1{}^2 + L_1{}^2 \omega^2} + \frac{L_2 \omega}{w_2{}^2 + L_2{}^2 \cdot \omega^2} \quad \ldots \quad 19)$$

ist.

Sind mehr als zwei Widerstände mit Selbstinduktion parallel geschaltet, so bestehen die Grössen Q und P aus mehr als zwei ähnlich gebildeten Gliedern.

5. Die Drosselspulen als Beispiele für induktive Widerstände.

Von diesen soeben hier mitgeteilten Formeln und Konstruktionen wird besonders häufig bei der Bestimmung der sogenannten Drosselspulen Gebrauch gemacht.

Die Drosselspulen sind Spulen mit geteilten Eisenkernen, also Elektromagneten mit hoher Selbstinduktion und geringem Widerstande, die an Stelle der induktionsfreien Widerstände als Vorschaltwiderstände oder als zu Beleuchtungskörpern (Bogen- oder Glühlampen) parallel geschaltete Widerstände in Wechselstromkreisen vielfach verwendet werden.

Will man z. B. von einem Wechselstromkreise aus, in dem der effektive Spannungsunterschied 50 V beträgt, eine Wechselstrombogenlampe speisen, die für 6 A nur 26—30 V Klemmspannung beansprucht, so müssten in einem vorgeschalteten induktionsfreien Widerstande $50 - 30 = 20$ V Spannung verbraucht und $20 \cdot 6 = 120$ Watt nutzlos in Wärme umgesetzt werden, während in der Lampe selbst nur $30 \cdot 6 = 180$ Watt nutzbringend verwendet werden. Benutzt man anstatt eines induktionsfreien Widerstandes eine Drosselspule mit grosser Selbstinduktion, so wird die in der Spule entwickelte elektromotorische Gegenkraft der Selbstinduktion stromschwächend wirken, und der Energieverbrauch in dieser Spule braucht nicht mehr als etwa 40 — 60 Watt zu betragen, weil nur ein Verbrauch für die mit der Ummagnetisierung des Eisens unvermeidlich verknüpften Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme stattfindet. Der Widerstand der Wickelung ist meist so gering, dass die in ihm verbrauchte Stromwärme ausser Betracht gelassen werden kann. Ausserdem wirkt die Drosselspule selbstthätig regelnd auf die Spannung ein. Wächst z. B. die Stromstärke, so wird die Selbstinduktion vergrössert, weil mehr Kraftlinien erzeugt werden, dadurch aber tritt eine stärkere Schwächung ein als vorher.

Zweckmässiger noch als die Verwendung von Drosselspulen in Hintereinanderschaltung mit Bogenlampen ist in manchen Fällen der Gebrauch kleiner Bogenlampentransformatoren, deren Primärstromkreis man von der Wechselstromleitung abzweigt und in deren sekundären Stromkreis man die Bogenlampen mit einem kleinen Vorschaltwiderstand legt.

Die Richtigkeit dieser Behauptung geht z. B. aus folgendem hervor:

Die Betrachtung, dass man in Drosselspulen ohne wesentlichen Energie-Aufwand eine grössere elektromotorische Gegenkraft erzeugen kann, hat dazu geführt, solche Spulen auch zu verwenden, um nur eine Lampe brennen zu lassen, also um z. B. bei 120 Volt Betriebsspannung 90 Volt aufzunehmen. Man sagte, die in der Drosselspule verzehrte Arbeit komme nicht in Betracht gegenüber der in der Lampe selbst aufgewendeten, und jedenfalls ist eine solche Drosselspule viel ökonomischer, als wenn man gewöhnlichen Widerstand vorschalten würde. Allein hierbei ist ein Punkt übersehen worden. Allerdings ist die in der Drosselspule verzehrte Arbeit gering, aber vom Netz wird der volle Strom für eine Lampe entnommen, mit dem man in Hintereinanderschaltung drei Lampen speisen könnte. Oder anders gesagt: würde man mit solchen Drosselspulen drei Lampen von je 10 Ampère an das Netz anschliessen, so würde man damit dem Netz 30 Ampère entnehmen; schaltet man dagegen die drei Lampen hintereinander, so braucht man nur 10 Ampère dem Netz zu entnehmen. Die Drosselspulen konsumieren wattlosen Strom. Der wattlose Strom verbraucht so gut wie keine Arbeit, aber er belastet das Netz und die Maschinen unnötiger Weise. Wir müssen ihn daher als einen Nachteil betrachten, den man thunlichst vermeiden muss.

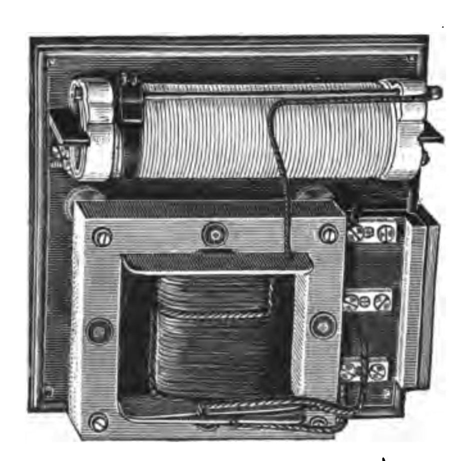


Fig. 18. Transformator nebst Vorschaltwiderstand für eine Bogenlampe. (Siemens & Halske.)

Hierzu giebt es nun bei der Bogenlichtbeleuchtung ein ausgezeichnetes Mittel in den Bogenlampentransformatoren, die nicht teurer sind als die Drosselspulen. Für eine 9-Ampère-Lampe, die mit 30 Volt brennt, wird der Strom durch einen kleinen Transformator von 120 auf etwa 40 Volt umgeformt, und 10 Volt hiervon werden von einem Beruhigungswiderstand aufgenommen. Man könnte auch hier eine Drosselspule verwenden, allein dem stehen im allgemeinen die höheren Kosten im Wege. Man transformiert also von 120 auf 40 Volt und braucht daher vom Netz für die 9-Ampère-Lampe nur etwa 3 Ampère zu entnehmen. Hat man zwei Lampen, so kann man diese parallel vom Transformator abzweigen, man entnimmt dann aus dem Netz 6 Ampère. Man hat auf diese Weise beim Wechselstrom und Drehstrom ein bequemes Mittel, jede Lampe für

sich brennen zu lassen, ohne dabei erhebliche Energie zu verschwenden, und wird sich dieses Mittels bedienen, wo man nur einzelne Lampen braucht, während man in den Fällen, wo man dauernd eine grössere Anzahl von Lampen brennt, die Lampen einfach hinter einander schalten wird. In der Teilbarkeit des Lichtes ist der Wechselstrom dem Gleichstrom thatsächlich etwas überlegen.

Nebenstehende Abbildung (Fig. 18), zeigt einen solchen kleinen Transformator nebst Vorschaltwiderstand für eine Wechselstrombogenlampe in einer Ausführung, die von Siemens & Halske vielfach verwendet worden ist.

Bei Beleuchtungseinrichtungen mit zahlreichen hinter einander geschalteten Lampen, die mit Wechselstrom betrieben werden, wird parallel zu jeder einzelnen Lampe eine Drosselspule geschaltet. Dann kann jede Lampe einzeln ausgeschaltet werden oder erlöschen, ohne dass der ganze Stromkreis unterbrochen wird. Es sind dann keine Kurzschlussvorrichtungen mit beweglichen Teilen erforderlich, die im Falle des Erlöschens einer Lampe von selbst in Thätigkeit treten müssen, und gegen deren Gebrauch zahlreiche berechtigte Bedenken erhoben werden müssen.

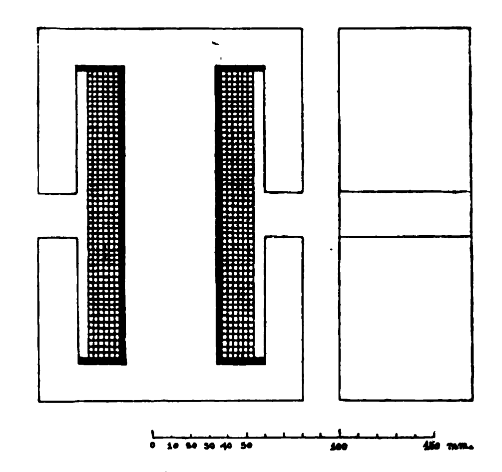


Fig. 19. Schematische Darstellung einer Drosselspule. (Helios.)

Nebenstehende schematische Abbildung (Fig. 19), zeigt eine solche Drosselspule, wie sie Helios in Ehrenfeld - Köln benutzt. Dieselbe besteht aus einem doppelt T förmigen geblätterten Eisenkörper, der mit einer Spule umwickelt ist. Dadurch, dass man durch die Fuge eine grössere oder kleinere unmagnetische Zwischenschicht einschaltet, kann man durch Vergrösserung oder Verkleinerung des magnetischen Widerstandes die Selbstinduktion nach Bedarf verringern oder vergrössern.

Fig. 20 stellt eine Drosselspule dar, wie sie die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, vormals Schuckert & Co., in Nürnberg anwendet. An die Pole eines Hufeisenelektromagneten kann die oben befindliche Anker mehr oder weniger angenähert und d der magnetische Widerstand des Wechselstromkreises verän

6. Bestimmung einer Drosselspule, die vor eine Bogenlampe geschaltet wird.

In untenstehendem Diagramm (Fig. 21) ist der beispielsweise von uns behandelte Fall, dass eine Wechselstrombogenlampe und eine Drosselspule hintereinander geschaltet sind, graphisch dargestellt. O A ist

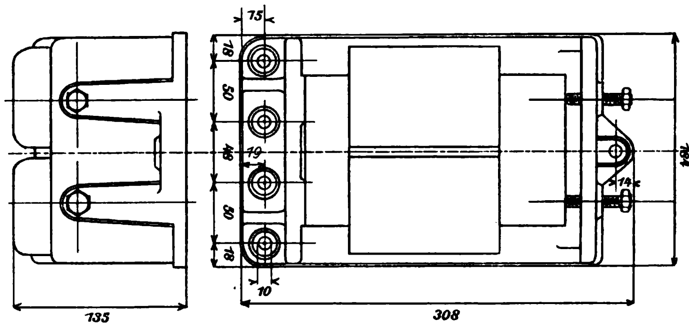


Fig. 20. Drosselspule mit Hufeisenelektromagnet. (Schuckert & Co.)

die gesamte EMK, also im vorliegenden Beispiele im Massstabe der Volt (O A = E) 50 V. Über dieser Linie schlagen wir einen Halbkreis und konstruieren in diesem ein rechtwinkliges Dreieck. Wir

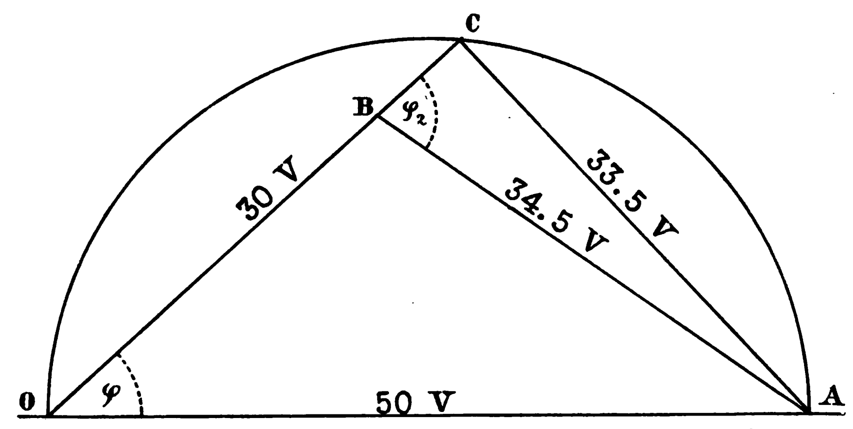


Fig. 21. Bestimmung einer Drosselspule, die vor eine Wechselstrombogenlampe geschaltet werden soll.

wählen die von O ausgehende Kathete $\overline{OC} = \overline{OB} + \overline{BC} = E_1 + E_2 = E_1 + w_2 \cdot J$, wobei E_1 die Spannung ist, mit der die Bogenlampe maænnen soll (d. i. im allgemeinen etwa 30 V), und w_2 J die im Ohm-dann Widerstande w_2 der Drosselspule verbrauchte EMK. J ist die WechselstrLampe fliessende Stromstärke, also z. B. 6 A.

Die andere Kathete CA ist die Selbstinduktion $L_2 \cdot \omega \cdot J$. Alsdann ist AB die zur Überwindung der Impedanz der Drosselspule erforderliche EMK E_2.

Der Winkel φ_2 ist die Phasenverschiebung, um die der Strom in der Drosselspule hinter der EMK zurückbleibt; φ ist der Winkel, um welchen der Strom infolge der Einschaltung des ganzen Systems hinter der Spannung zurückbleibt.

Da nach dem Cosinussatze der Trigonometrie

$$\overline{AB}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 - 2\overline{OA} \cdot OB \cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

ist, so folgt:

$$\cos\varphi = \frac{\overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 - \overline{AB}^2}{2\overline{OA} \cdot \overline{OB}} = \frac{E^2 + E_1^2 - E_2^2}{2E \cdot E_1} \quad . \quad 21)$$

Auf dieselbe Weise findet man:

$$\cos\varphi_2 = \frac{E^2 - E_1^2 - E_2^2}{2E_1 \cdot E_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 22)$$

Ferner ist auch:

$$\operatorname{tang}\varphi_2 = \frac{L_2\,\omega}{W_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 23)$$

In dem Teil des Stromkreises, der keine Selbstinduktion ent-
ist die verbrauchte Energie $\frac{E_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{J}{\sqrt{2}}$, weil hier kein Phasen-
wischen Strom und Spannung stattfindet.

selspule ist die verbrauchte Energie $\frac{E_2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{J}{\sqrt{2}} \cos\varphi_2$.

2 beziehen sich darauf, dass wir, um die verbrauchte
halten, die quadratischen Mittelwerte[1]) benutzen müssen.
ganzen Stromkreise verbrauchte Energie ist

$$\frac{E}{\sqrt{2}} \cdot \frac{J}{\sqrt{2}} \cdot \cos\varphi.$$

hren wir nun zum Zahlenbeispiel zurück, so ist $\frac{E}{\sqrt{2}} = 50\,V$,

$\frac{\ }{\sqrt{2}} = 30\ V$, $\frac{J}{\sqrt{2}} = 6$ Ampère. Sollen aber im ganzen Stromkreise bei 6 Ampère Stromstärke nur 220 Watt, und zwar 180 Watt in der Bogenlampe, 40 Watt in der Drosselspule, verbraucht werden, so muss:

$$220 = 50 \cdot 6 \cdot \cos\varphi, \quad \cos\varphi = \frac{220}{300}, \quad \varphi = 43^0$$

sein. Wir tragen also in Fig. 21 unter dem Winkel von 43^0 die

[1]) Vergl. Kapitel I, 7., S. 13.

Linie OC an und machen $\overline{OB} = 30$ V. Dann ist $BC = 7$, mithin der Ohm'sche Widerstand der Drosselspule $w_2 = \frac{7}{6} = 1{,}2$ Ohm. Die Grösse $\overline{AC}$ ergiebt sich aus der Zeichnung zu 33,5. Daraus kann man den Koëffizienten der Selbstinduktion der Drosselspule, die Grösse L, bestimmen. Nehmen wir an, dass der Wechselstrom in 1 Sek. 66 volle Perioden macht, dass also 132 Polwechsel stattfinden, so ist $\omega = 2\pi \sim = 2\pi \cdot 66 = 414{,}7$. $\sim$ ist die Zahl der vollen Perioden, die der Wechselstrom in einer Sekunde durchläuft, und die Anzahl der vollen Umläufe der Vektoren in einer Sekunde.

Ferner ist nach Formel 22:

$$\cos\varphi_2 = \frac{50^2 - 30^2 - 34{,}5^2}{2 \cdot 30 \cdot 34{,}5}, \text{ somit: } \varphi_2 = 78\tfrac{1}{2}^0,$$

und (nach Gl. 2):

$$L_2 = \frac{W_2}{\omega} \cdot \operatorname{tang}\varphi_2 = \frac{1{,}2}{414{,}7} \cdot \operatorname{tang} 78\tfrac{1}{2} = 0{,}014 \text{ Henry.}$$

7. Beispiel einer Drosselspule, die einer Glühlampe parallel geschaltet ist.

Wir behandeln ferner als Beispiel den Fall der Parallelschaltung einer Glühlampe und einer Drosselspule[1]) in einem Wechselstromkreise mit konstanter Stromstärke.

Die Glühlampe habe einen Widerstand $w_2 = 2$ Ohm, die Drosselspule einen Selbstinduktionskoëffizienten von $L_1 = 0{,}02$ Henry, die unveränderliche Stromstärke im ungeteilten Stromkreise betrage 10 Ampère (ω sei $= 1000$). Es sollen die Stromstärken in den beiden Zweigen und der Spannungsunterschied E an den beiden Enden der Stromverzweigung bestimmt werden.

Da uns in diesem Falle E nicht bekannt ist, nehmen wir ganz willkürlich $E = 10$ Volt an. Dann ist, da $E = J_2 \cdot w_2$ sein muss,

$$J_2 = \frac{E}{w_2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ A} \qquad J_1 = \frac{E}{L_1\,\omega} = \frac{10}{0{,}02 \cdot 1000} = 0{,}5 \text{ A.}$$

Wir zeichnen nun ein Diagramm (Fig. 22) und machen $\overline{OP} = 5$ A und $\overline{OH} = 0{,}5$ A, dann ist:

$$\overline{OS} = \sqrt{5^2 + 0{,}5^2} = 5{,}025 \text{ A.}$$

Da der ungeteilte Strom OS aber 10 A, statt hier 5,025 A, sein sollte, muss man eigentlich das Diagramm im Verhältnis von $\frac{10}{5{,}025}$

---

[1]) Dieses Beispiel ist dem Werke von Bedell und Crehore, »Theorie der Wechselströme«, deutsch von Buchener, S. 206, entnommen.

vergrössern, um die wahre Grösse der Zweigströme und den wahren Wert des Spannungsunterschiedes zu finden.

Es ergiebt sich dann

$$J_2 = \frac{5 \cdot 10}{5,025} = 9,95 \text{ A}, \qquad J_1 = \frac{0,5 \cdot 10}{5,025} = 1,00 \text{ A},$$

und

$$E = \frac{10 \cdot 10}{5,025} = 19,9 \text{ Volt}.$$

Die in der Drosselspule verbrauchte Energie ist sehr klein, da der Phasenwinkel H O S′, um den J_1 hinter der Spannung zurückbleibt, fast 90°, der Cosinus dieses Winkels also sehr klein ist.

Wenn der Faden der Glühlampe plötzlich durchbrennt, würde der ganze Strom von 10 A durch die Windungen der Drosselspule fliessen. J_1 würde gleich J werden. Dann würde die induzierte E M Gegenkraft der Selbstinduktion beträchtlich wachsen. Unter der unzutreffenden Annahme, dass L_1 unveränderlich blieb, würde sie $L_1 \omega J_1 = 0,02 \cdot 1000 \cdot 10 = 200$ V werden. Wir würden darnach, um die Stromstärke unverändert zu erhalten, die Spannung der Wechselstrommaschine um einen entsprechenden Betrag erhöhen müssen.

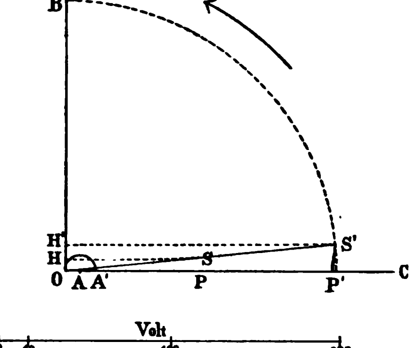


Fig. 22. Eine Drosselspule parallel einer Glühlampe geschaltet.

Der Strom würde aber infolge des Durchbrennens der Glühlampe nicht unterbrochen werden, und das ist von hoher Wichtigkeit, wenn eine grosse Anzahl von Glühlampen in einem Stromkreis in Hintereinanderschaltung betrieben werden soll. [1])

8. Ein Kondensator in einem Wechselstromkreis.

Wenn wir zwei, die Elektrizität leitende Flächen parallel anordnen und durch eine isolierende Schicht von einander trennen, so bildet diese Vorrichtung einen Kondensator. Eine Franklin'sche Tafel, eine Leydener Flasche, ein konzentrisches Kabel, ein in ein leitendes Mittel eingebettetes isoliertes Kabel bilden somit Kondensatoren.

[1]) Eine Anlage, bestehend aus hinter einander geschalteten Glühlampen, denen je eine Drosselspule parallel geschaltet ist, dient z. B. zur Beleuchtung des Nordostseekanals.

Das Eigentümliche eines solchen Kondensators liegt darin, dass gewisse Elektrizitätsmengen von gleicher Grösse, aber entgegengesetzten Vorzeichens auf den Belegen, d. h. auf den beiden Seiten der isolierenden Schicht, angehäuft werden müssen, damit diese beiden Belege eine gewisse Potentialdifferenz erlangen.

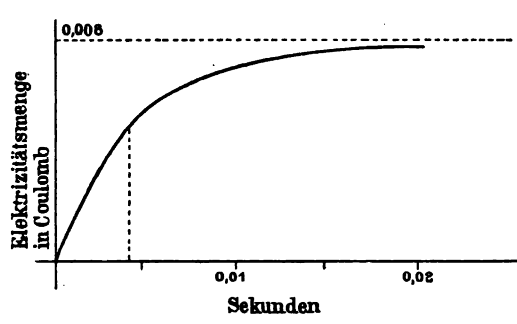


Fig. 23. Verlauf der Ladung eines Kondensators.

Die Erhöhung der Potentialdifferenz ist der Menge der zuströmenden Elektrizität proportional. Die Elektrizitätsmenge, die erforderlich ist, um einen Spannungsunterschied von 1 Volt zwischen den Belegen hervorzurufen, heisst die Kapazität des Kondensators. Die Kapazität hängt von der Grösse und geometrischen Form des Kondensators und von der Dicke und der Beschaffenheit (der Dielektrizitätskonstanten) des isolierenden Zwischenmittels ab.

Nehmen wir an, ein Widerstand W und ein Kondensator, dessen Kapazität C betrage, seien hinter einander geschaltet und werden plötzlich an eine Elektrizitätsquelle angelegt, die einen konstanten Spannungsunterschied hervorruft. Alsdann beginnt der Kondensator sich zu laden.

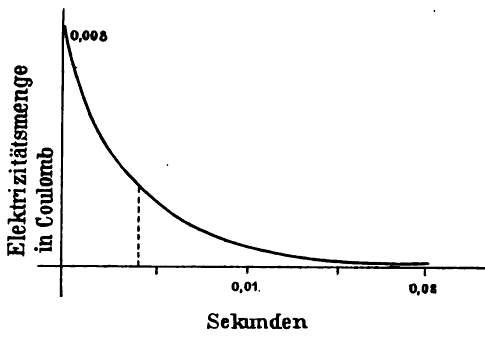


Fig. 24. Verlauf der Entladung eines Kondensators.

Die Elektrizitätsmengen, die der Kondensator nach und nach aufnimmt, sind für ein bestimmtes Beispiel (W = 100 Ohm, C = 4 Mikrofarad, Spannung 200 V) in Fig. 23 als Funktion der Zeit bildlich dargestellt. Während der kurzen Zeit der Ladung fliesst scheinbar ein Strom, Ladestrom genannt, durch die isolierende Zwischenschicht hindurch.

Wenn wir hierauf die bisher an die beiden Pole der Elektrizitätsquelle angelegten Drähte mit einander verbinden, so beginnt der Kondensator sich zu entladen; es fliesst nunmehr ein dem Ladestrom entgegengesetzt gerichteter Entladestrom durch die Drähte.

Die Fig. 24 zeigt die Abnahme der in dem Kondensator aufgespeicherten Elektrizitätsmengen zu den verschiedenen Zeitmomenten nach Beginn der Entladung.

Die beiden Kurven, die bei der Ladung und bei der Entladung erhalten werden, sind wahrscheinlich nahezu kongruent und nur der Lage nach verschieden.

Verbindet man einen Kondensator durch Leiter mit einer Elektrizitätsquelle, die einen Wechselstrom hervorzubringen imstande ist, also eine nach einer Sinusfunktion sich ändernde EMK erzeugt, so wird der Kondensator geladen, entladen, entgegengesetzt geladen, wieder entladen u. s. f. Durch die Leitung fliesst alsdann ein verhältnismässig schwacher Wechselstrom, dessen Stärke von der Grösse der EMK der Elektrizitätsquelle, von der Kapazität des Kondensators und von dem Widerstande abhängt.

Der jeweilige Spannungsunterschied der beiden Belege des Kondensators wird sich alsdann von der Klemmenspannung der Elektrizitätsquelle nur um den geringfügigen Betrag unterscheiden, der gleich dem Spannungsverluste ist, den der Ladungsstrom und Entladungsstrom in dem Widerstande der Leitungen veranlasst.

Wenn der Spannungsunterschied der beiden Belege des Kondensators seinen höchsten positiven Wert erreicht, wird der Ladestrom Null. Unmittelbar darauf beginnt der Entladestrom zu fliessen, und die positive Spannung nimmt mehr und mehr ab.

Wenn der Entladestrom seine grösste Stärke erreicht hat, ist der Spannungsunterschied der beiden Belege Null geworden. Während hierauf der Entladestrom an Stärke mehr und mehr abnimmt, wächst die negative Ladung und damit der dem vorigen entgegengesetzte Spannungsunterschied der Belege mehr und mehr. Wenn die Kondensatorspannung ihr negatives Maximum erreicht hat, hört der negativ gerichtete Strom auf zu fliessen und ändert sein Vorzeichen. Der Kondensator beginnt seine negative Ladung abzugeben und ruft einen positiven Strom hervor, der sein Maximum erreicht, wenn der Kondensator wieder vollständig entladen ist. — Diese Vorgänge wiederholen sich nun in jeder vollen Periode des Wechselstromes in derselben Weise je einmal.

Ändert sich der Strom nach einer Sinuswelle, so ändert sich auch die Ladung des Kondensators periodisch nach einer Funktion, die praktisch als eine Sinusfunktion angesehen werden kann. In der Zeit, zu welcher der Spannungsunterschied der Kondensatorbelege das positive Maximum erreicht, wird der positive Ladestrom Null und wechselt seine Richtung. Die Welle, durch welche die nach einer Sinusfunktion sich ändernde EMK der Kondensatorbelege dargestellt werden kann, eilt somit vor der Welle, durch welche die

Änderung des Stromes dargestellt werden kann, um die Zeitdauer einer Viertelperiode voran, d. h. sie erreicht schon $^1/_4$ Wellenlänge näher nach dem Ausgangspunkte der Bewegung hin die positiven und negativen Maxima und die Nullwerte.

Wenn man die Darstellung periodischer Änderungen durch die Projektion rotierend gedachter Vektoren wählt, eilt somit der Vektor, den die Kondensatorspannung darstellt, vor dem Vektor, der den Strom darstellt, um 90° voraus.

Da erfahrungsmässig diejenigen, welche sich mit der Lehre von den Wechselströmen zu beschäftigen beginnen, es schwierig finden, das Vorzeichen des Phasenunterschiedes zwischen Strom und Kondensatorspannung richtig zu begreifen, so wählen wir ein einfaches Beispiel aus der Mechanik,[1]) das zur Veranschaulichung der Vorgänge sehr geeignet erscheint. (Vergl. Fig. 25.)

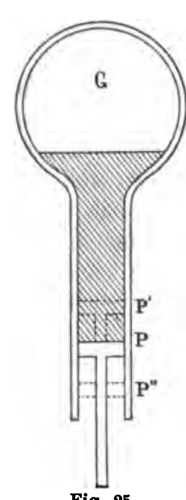


Fig. 25.
Veranschaulichung der Ladung und Entladung eines Kondensators durch einen Wechselstrom.

Den Kondensator denken wir uns durch ein mit Luft gefülltes Gefäss G dargestellt, in welchem die Luft durch eine Flüssigkeitsmenge abgeschlossen ist. Ein Kolben P, der etwa durch eine bewegliche Stange und Excenter mit einer rotierenden Welle verbunden ist, bewegt sich periodisch in dem cylindrischen Halse des Gefässes auf und nieder und schiebt dabei die Flüssigkeit vor sich her.

Die Ladung des Kondensators wird dann durch die in den kugelförmigen Hohlraum eindringende Flüssigkeit, der elektrische Strom durch den Strom der in den Hohlraum eindringenden oder aus ihm ausfliessenden Flüssigkeit und der Spannungsunterschied der Kondensatorbelege durch den Druck der im Gefässe enthaltenen Luft dargestellt. Der Einfachheit wegen nehmen wir an, dass der Druck der eingeschlossenen Luft gleich dem Drucke ausserhalb des Gefässes sei, wenn sich der Kolben in der mittleren Stellung P befindet.

Wenn der Kolben auf seinem Wege in der Richtung von P" nach P' sich in der Stellung P befindet, ist die Ladung Null, da der Druck im Inneren des Gefässes gleich dem äusseren Drucke ist, der positive Strom ist in diesem Zeitpunkte am stärksten, weil der Kolben durch seine Gleichgewichtslage mit der grössten Geschwindig-

---

[1]) Dasselbe findet sich zuerst bei Bedell und Crehore, »Alternating C[illegible] New-York 1893, deutsch von A. Buchener, Berlin, J. Springer, S. 230.

keit hindurch geht. Die Punkte H auf der Wellenlinie I der EMK des Kondensators und K auf der Linie des Stromes (Linie II) entsprechen diesem Augenblicke. (Vergl. Fig. 26.)

Ist dann der Kolben in seiner höchsten Lage P' angekommen, in der er dann umgekehrt, so entspricht dies dem Punkte n auf der Stromkurve. Die Ladung des Kondensators und die Spannung desselben ist dann am grössten, es entspricht dies dem Punkte m. Die Welle Hm geht nach unten, weil die Kondensatorspannung einen dem positiven Strom entgegengesetzt fliessenden Strom veranlassen würde, also einer entgegengesetzt gerichteten EMK entspricht.

Während der Kolben sich auf dem Wege P'P nach aussen bewegt, wirkt der Druck des eingeschlossenen Gases in derselben Richtung, in der der Flüssigkeitsstrom fliesst, daher befinden sich die entsprechenden Kurventeile der Spannungskurve I und der Stromkurve II unterhalb der Abscissenachse, auf der negativen Seite. Wenn

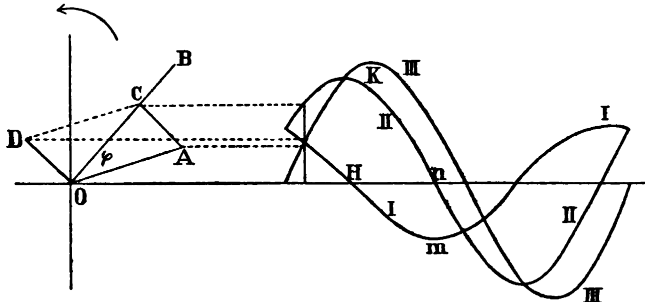


Fig. 26. Ein Kondensator in einem Wechselstromkreise.

der Strom sein negatives Maximum erreicht, der Kolben mit maximaler Geschwindigkeit durch die Gleichgewichtslage hindurch geht, ist die Kondensatorspannung wieder Null geworden und nimmt weiterhin positive Werte an, d. h. sie wirkt der negativen Richtung des Stromes entgegen.

Man erkennt aus diesen Wellenlinien in der That, dass der Druck, den die Luft ausübt, d. h. die Kondensatorspannung I, um eine Viertelperiode früher die nämliche Phase besitzt, wie der Strom II.

Der Druck, der auf den Kolben ausgeübt werden muss, um den Druck der im Gefässe eingeschlossenen Luft zu überwinden, entspricht der Komponente der EMK, die aufgewendet werden muss, um die Spannung des Kondensators zu überwinden; diese EMK ist daher der Kondensatorspannung gleich, aber entgegengesetzt gerichtet, sie bleibt somit um eine Viertelperiode hinter dem Strome zurück.

9. Ein Wechselstromkreis mit Widerstand und Kapazität in Hintereinanderschaltung.

Wir stellen uns vor, in dem Stromkreise einer Wechselstrommaschine befinde sich ein Widerstand, der frei von Selbstinduktion ist, und ein Kondensator. Der Widerstand betrage W Ohm, die Kapazität des Kondensators sei gleich C Farad, und $\omega = 2\pi \sim$ sei die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich die Vektoren drehen, durch die wir die periodisch sich ändernden Grössen darstellen.

Die Drehrichtung der Vektoren ist in Fig. 26 durch einen Pfeil angedeutet.

Der periodisch sich ändernde Strom, der alsdann scheinbar durch die isolierende Zwischenschicht, das Dielektrikum des Kondensators, hindurch fliesst, sei J, und ferner sei E_c die Potentialdifferenz des Kondensators. Wenn wir dann E_c als Vektor $\overline{OD}$ in irgend einer Richtung in bestimmtem Massstabe abtragen, so muss der Strom OB, abgetragen im Massstabe, den wir für die Ampère wählen, um 90^0 in der Drehung hinter dem Vektor OA zurück bleiben, denn eine volle Umdrehung um 360^0 entspricht einer ganzen Welle in der vorhergehenden Darstellung, ein Phasenunterschied von einer Viertelwelle gehört somit zu einem Winkel von 90^0. Da der induktionsfreie Widerstand im Stromkreise W beträgt, entspricht dem durch W fliessenden Strome J ein Spannungsverlust von der Grösse WJ, der mit dem Strom in gleicher Phase ist, also mit ihm auf demselben Vektor liegt. Wir tragen daher auf der zu OD senkrechten Geraden OB noch eine zweite Strecke OC = WJ ab. — Um nun die EMK der Elektrizitätsquelle E_G zu finden, berücksichtigen wir, dass sich E_G aus zwei Komponenten zusammensetzt, deren eine der Spannungsverlust WJ, deren andere die EMK ist, die erforderlich ist, um die Potentialdifferenz des Kondensators E_c zu überwinden. Diese letzte Komponente muss somit gleich OD, aber dieser entgegengesetzt gerichtet sein. Wir machen also die OD entgegengesetzt gerichtete Strecke CA = OD. Die Strecke OA ist alsdann die EMK der Wechselstrommaschine; diese EMK ist erforderlich, um in dem Widerstande W den Strom J und am Kondensator gleichzeitig die Spannung E_c hervorzurufen.

Man erkennt sofort, dass:

$$\overline{OA} = \sqrt{\overline{OC}^2 + \overline{CA}^2}$$

ist.

Hierin ist nun $\overline{CA}$ an Grösse gleich der Kondensatorspannung E_c und diese ist:

$$E_c = \frac{J}{\omega C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 24)$$

$\overline{OC}$ aber hat bekanntlich den Wert W · J. Man findet somit:

$$E_G = \sqrt{\left(\frac{J}{\omega \cdot C}\right)^2 + (J \cdot W)^2} = J \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2 + W^2} \quad . \quad 25)$$

Hiernach ist:

$$J = \frac{E_G}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2 + W^2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 26)$$

Die Wurzelgrösse stellt somit die Impedanz des Wechselstromkreises dar, in dem ein Widerstand W und ein Kondensator hinter einander an einen Wechselstrom liefernden Apparat angeschlossen sind. Man bemerkt, dass in diesem Falle der Strom, der scheinbar durch das isolierende Zwischenmittel fliesst, der EMK der Maschine um einen Phasenwinkel φ vorauseilt. Nach der Fig. 26 kann φ leicht aus der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{\overline{CA}}{\overline{OC}} = \frac{\frac{J}{\omega \cdot C}}{J \cdot W} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 27)$$

Zahlenbeispiel.[1]) Ein konzentrisches Kabel von 4,9 *km* Länge und 220 *qmm* Querschnitt besteht aus einem inneren Leiter von 2 *cm* Dicke, der innere Radius des den äusseren Leiter bildenden konzentrischen Hohlcylinders betrage 1,5 *cm*. Die Dielektrizitätskonstante des zwischenliegenden Isolationsmateriales betrage 3,0. Alsdann beträgt die Kapazität C dieses als Kondensator wirkenden Kabels C = 2 Mikrofarad = 0,000002 Farad. Die Zahl der Perioden in der Minute betrage 3000; dann ist $\sim = 100$ und die Winkelgeschwindigkeit der Vektoren im Diagramm $\omega = 2\pi \cdot \sim = 314$. Die EMK der Stromquelle sei 2000 V. Dann ist nach Gleichung 24

$$J = \omega \cdot C \cdot E_C = 314 \cdot 0{,}000002 \cdot 2000 = 1{,}26 \text{ A.}$$

Es wird also, wenn nun das Kabel allein an die Wechselstrommaschine angeschlossen ist, ein Strom von ungefähr $1\frac{1}{4}$ A scheinbar fortwährend durch die Isolationsschicht des Kabels hindurch fliessen.

Unzweifelhaft treten durch die wiederholte Ladung, Entladung, entgegengesetzte Ladung und Entladung u. s. f. eines Kondensators molekulare Arbeitsleistungen in der isolierenden Zwischenschicht desselben, in dem Dielektrikum, ein. Dieselben sind aber so gering, dass der dadurch etwa entstehende Energieverlust für die Praxis vernachlässigt werden kann.

10. Kapazität, Widerstand und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung im Wechselstromkreise.

In diesem Falle haben wir zwei einander gerade entgegengesetzt wirkende EM Kräfte im Stromkreise. Die elektromotorische Gesamt-

[1]) Vergl. Cl. Feldmann, Elektrotechn. Ztschr. 1892, S. 88.

kraft E_G muss imstande sein, den Spannungsverlust $E_N = J_G \cdot W$ im Widerstande von der Grösse W zu überwinden, wenn J_G der den Widerstand durchfliessende Strom ist. Ausserdem muss aber auch noch die Klemmenspannung

$$E_c = \frac{J_G}{\omega \cdot C} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 28)$$

des Kondensators und die EMK der Selbstinduktion $E_s = L \cdot \omega \cdot J_G$ überwunden werden. Die EMK der Selbstinduktion eilt dem Strome um 90° voraus, die EMK des Kondensators bleibt um 90° hinter dem Strome zurück; diese beiden EMK wirken daher einander gerade entgegen, und man kann in die Konstruktion ohne weiteres die Differenz beider

$$E_C - E_s = J_G \cdot \left(\frac{1}{C \cdot \omega} - L \cdot \omega \right) \quad 29)$$

als einzige einführen, die je nach dem Vorzeichen um 90° hinter dem Strome in der Phase zurückbleibt oder um 90° voreilt.

Fig. 27. Kapazität, Widerstand und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung.

Um im vorliegenden Falle das Vektordiagramm zu erhalten (Fig. 27), wählt man zunächst in einem willkürlichen Massstabe für die Stromstärke $\overline{OJ} = J_G$. Dann multipliziert man J_G mit W, mit dem Widerstande, und wählt für die Spannungen einen Massstab; nach diesem macht man $\overline{OE_N} = J_G \cdot W$. Senkrecht dazu trägt man $E_C - E_s$ im Massstabe der Volt auf und bildet das Rechteck; dann ist $\overline{OF}$ die Spannung, die nötig ist, um den Wechselstrom J_G in dem Systeme hervorzurufen, welches aus Kondensator, Widerstand und Selbstinduktion besteht. Die Phasenverschiebung der EMK der Stromquelle $\overline{OF}$ gegen den Strom wird im vorliegenden Falle durch den Winkel $E_N\,OF$ gemessen.

Man erkennt sofort, dass, wenn $E_C = E_s$ oder $\frac{1}{C\omega} = L\omega$ $C = \frac{1}{L\omega^2}$ wird, die Phasenverschiebung den Wert Null annimmt.

Wenn also die verzögernde Wirkung der Selbstinduktion ebenso gross ist, als die beschleunigende Wirkung der Kapazität, so sind der Strom in dem Widerstande und die EMK der Stromquelle in gleicher Phase und die EMK ist das Produkt aus Stromstärke und Widerstand, wie bei Gleichstrom.

In der Praxis dürfte dieser Grenzfall jedoch selten oder nie vorkommen.

Man erkennt ferner, dass während in den früher behandelten Fällen die EMK der Stromquelle immer grösser sein musste, als die EMK der Selbstinduktion oder als die EMK des Kondensators, die Möglichkeit vorliegt, dass, wenn Kapazität und Selbstinduktion gleichzeitig in demselben Wechselstromkreise in Hintereinanderschaltung vorkommen, die EMK der Stromquelle kleiner sein kann, als die EMK an den Klemmen des Kondensators oder als die EMK an den Klemmen des Teiles des Stromkreises, der mit Selbstinduktion behaftet ist.

Nach unseren Formeln ist:

$$E_C = \frac{J_G}{C\omega} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 30)$$

und ferner ist die EMK der Stromquelle $\overline{OF}$ in unserem Diagramm (Fig. 27)

$$\overline{OF} = \sqrt{(E_C - E_s)^2 + E_N^2} = \sqrt{\left(\frac{J_G}{C\omega} - J_G L\omega\right)^2 + (J_G \cdot W)^2} \quad 31)$$

Demnach ist das Verhältnis der EMK des Kondensators zu EMK der Stromquelle:

$$\frac{E_C}{\overline{OF}} = \frac{1}{C\,\omega\sqrt{\left(\frac{1}{C\cdot\omega} - L\omega\right)^2 + W^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - C L\omega^2)^2 + C^2\omega^2 W^2}} \quad 32)$$

Rechnet man die Grösse unter dem Wurzelzeichen aus, so erhält man:

$$\frac{E_C}{\overline{OF}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2\cdot C\cdot L\cdot\omega^2 + C^2\cdot L^2\cdot\omega^4 + C^2\cdot\omega^2\cdot W^2}} \quad . \quad 33)$$

Dieser Nenner kann nun gleich, grösser oder kleiner als 1 sein.

Der Radikand des Nenners wird gleich 1, wenn

$$2\,C\,L\,\omega^2 = C^2 L^2 \omega^4 + C^2 \omega^2 W^2$$

oder wenn

$$C = \frac{2L}{W^2 + \omega^2 L^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 34)$$

ist.

Hat C einen grösseren Wert, so wird der Nenner grösser als 1, dann ist die EMK der Stromquelle grösser als die des Kondensators. Hat aber C kleinere Werte, als den durch Gleichung 34 gegebenen, so ist die Spannung des Kondensators grösser, als die EMK der Stromquelle. Gleichzeitig sieht man, dass dieser Wert von der

Frequenz des Wechselstromes, von der Grösse ω oder von $\sim$, abhängig ist.

Die Kondensatorspannung ist der EMK der Stromquelle um den grössten Betrag überlegen, wenn die Kapazität

$$C = \frac{L}{W^2 + \omega^2 L^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 35)$$

d. h. halb so gross ist, als der in Gl. 34 angegebene kritische Wert.

Diese eigentümliche Erscheinung, die den Elektrotechnikern, die sich mit Wechselströmen beschäftigen, schon längere Zeit bekannt ist, führt den Namen: Resonanzeffekt.[1])

11. Selbstinduktion und Kapazität in Parallelschaltung.

Aus den Betrachtungen des vorhergehenden Paragraphen hat sich ergeben, dass in einem Wechselstromkreise das Auftreten von Selbstinduktion und das von Kapazität gerade entgegengesetzte Wirkungen ausübt. Die beiden Wirkungen konnten einfach von einander subtrahiert werden, weil sie gerade entgegengesetzt gerichtet waren. (Vergl. S. 42.) Diesem Thatbestand wird einfach dadurch Rechnung getragen, dass jede im Stromkreise auftretende Kapazität als eine negative Selbstinduktion in die Rechnung und in die Konstruktion eingeführt wird.

Die zur Überwindung einer Selbstinduktion von der Grösse L erforderliche EMK ist $J \cdot L \cdot \omega$ (vergl. S.23, Gl.6) und eilt dem Strome um 90^0 voraus. Die zur Überwindung der Spannung des Kondensators erforderliche EMK ist $\frac{J}{C \cdot \omega}$ und bleibt um 90^0 hinter dem Strome zurück; beide bilden mit der wirksamen EMK von der Grösse $J \cdot W$,

---

[1]) Die Analogie mit den akustischen Resonanzerscheinungen ist ziemlich weitgehend. Vernachlässigt man, was bei kleinen Werten des Widerstandes W und bei grösseren Werten von ω geschehen kann, W^2 gegen $L^2 \omega^2$, so erhält man nach Formel 35 die grösste Resonanz, wenn $C = \frac{L}{L^2 \omega^2} = \frac{1}{L \omega^2}$ ist. Da ω (vergl. S. 5, Gl. 5) $\omega = 2 \pi \sim = \frac{2\pi}{T}$ ist, ergiebt sich: $C = \frac{T^2}{4 \pi^2 L}$ oder $T = 2 \pi \sqrt{CL}$. Diese Schwingungsdauer der elektrischen Wellenbewegung stimmt überein mit der Formel für die Schwingungsdauer eines elastischen Körpers, dessen Trägheitsmoment L und dessen Elastizitätskoëffizient $\frac{1}{C}$ ist. Ein solcher Körper würde, wenn eine schwingende Bewegung von der Schwingungsdauer T in seiner Nähe bestände, durch Resonanz zum Mitschwingen veranlasst werden.

durch die der Strom veranlasst wird, den Widerstand zu durchfliessen, je einen Winkel von $+90^{\circ}$ und -90°.

Für alle praktischen Fälle kann man daher $\frac{1}{C\,\omega}$ als eine negative Selbstinduktion als eine Grösse $-L'\,\omega$ auffassen.

In die Rechnung und in die Konstruktion führt man also einfach die Differenz $\frac{1}{C\,\omega} - L\,\omega$ ein. Ist $\frac{1}{C\,\omega} > L\omega$, so eilt der Strom der treibenden EMK voraus, ist $\frac{1}{C\,\omega} < L\omega$, so bleibt der Strom hinter der treibenden EMK zurück. Ist $\frac{1}{C\,\omega} = L\omega$, so sind Strom und treibende EMK in gleicher Phase.

Die Tangente des Winkels φ, um den diese Voreilung oder das Zurückbleiben stattfindet, ist:

$$\tan\varphi = \frac{\left(\frac{1}{C\cdot\omega} - L\cdot\omega\right)\cdot J}{J\cdot W} = \frac{1}{C\cdot W\cdot\omega} - \frac{L\,\omega}{W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 36)$$

Die treibende EMK der Elektrizitätsquelle ist:

$$E = J\cdot\sqrt{W^2 + \left(\frac{1}{C\cdot\omega} - L\cdot\omega\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 37)$$

Der Wurzelwert ist die Impedanz (vergl. Fig. 27, S. 42), welche bei Wechselströmen an Stelle des Widerstandes in Ohm bei Gleichstrom tritt. Je nachdem also die Wirkung der Kapazität oder die der Selbstinduktion überwiegt, ersetzt man eine Verbindung beider Grössen durch eine Kapazität

$$C' = \frac{C}{1 - L\cdot C\cdot\omega^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 38)$$

oder durch eine Selbstinduktion

$$L' = L - \frac{1}{C\cdot\omega^2}.$$

Wir behandeln nunmehr beispielsweise den Fall, dass sich ein Wechselstromkreis an den Punkten M und N in zwei parallele Zweige verzweigt, die beide Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität enthalten, und nehmen an (vergl. Fig. 28), die treibende EMK zwischen den Verzweigungspunkten M und N sei bekannt und sei E.

Wir wählen zunächst die Gerade $\overline{OA}$ (vgl. Fig. 29) im Massstabe der Volt gleich E und konstruieren über OA als Durchmesser den Kreis. Hierauf bilden wir die Differenzen $\frac{1}{C_1\,\omega} - L_1\,\omega$ und $\frac{1}{C_2\,\omega} - L_2\,\omega$

und berechnen oder konstruieren die zugehörigen Voreilungs- oder Verzögerungswinkel

$$\operatorname{tg} \Theta_1 = \frac{\frac{1}{C_1\,\omega} - L_1\,\omega}{W_1} \quad \text{und} \quad \operatorname{tg} \Theta_2 = \frac{\frac{1}{C_2\,\omega} - L_2\,\omega}{W_2}$$

Dadurch sind alsdann die Dreiecke A B O und A C O bestimmt, und zwar ist: $\overline{OB} = W_1\,J_1$ die wirksame E M K im ersten und $\overline{OC} = W_2\,J_2$ die wirksame E M K im zweiten Zweige. Durch Division dieser Grössen mit den zugehörigen induktionslosen Widerständen W_1 bez. W_2 findet man die Stromstärken J_1 und J_2.

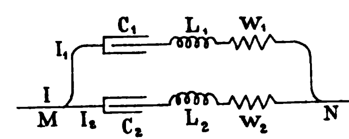


Fig. 28. Zwei parallel geschaltete Zweige mit Kapazität, Selbstinduktion und Widerstand.

Diese beiden Stromstärken setzt man alsdann nach dem Parallelogramm der Vektoren zusammen und findet sowohl die Stromstärke $J = \overline{OD}$, die im unverzweigten Teile des Stromkreises fliesst, als den Voreilungs- oder Verzögerungswinkel Θ des Stromes $J = \overline{OD}$ gegen die treibende E M K der Wechselstromquelle, die durch $\overline{OA}$ dargestellt war. Die Gerade $\overline{OD}$ schneidet die Kreisperipherie in F, demnach ist $\overline{OF} = W\,J$; W ist der induktionsfreie Widerstand und $\overline{AF}$ ist die Kapazität oder Selbstinduktion $\frac{1}{C \cdot \omega} - L \cdot \omega$, durch

Fig. 29.
Vektordiagramm für zwei parallel geschaltete Zweige mit Kapazität, Selbstinduktion und Widerstand.

die man den Widerstand, beziehentlich die Selbstinduktion und Kapazität, der beiden parallelen Stromzweige ersetzen könnte.

Wären mehr als zwei parallele Zweige vorhanden, so würde man zunächst die ersten beiden Zweige auf die soeben erläuterte Weise zu je einem sie ersetzenden W und $\frac{1}{C \cdot \omega} - L \cdot \omega$ zusammen-

setzen, diese würde man mit dem dritten vereinigen und so fortfahren, bis alle Zweige berücksichtigt worden wären.

Das Verfahren erinnert also in seinem Grundgedanken an die Zusammensetzung mehrerer an einem Punkte angreifender Kräfte, die zu einer Resultante vereinigt werden sollen. In diesem Falle kann man auch zuerst zwei Kräfte zu einer Resultante vereinigen, diese Resultante dann mit einer dritten Kraft zu einer neuen Resultante zusammensetzen und so fortfahren, bis alle Kräfte berücksichtigt sind.

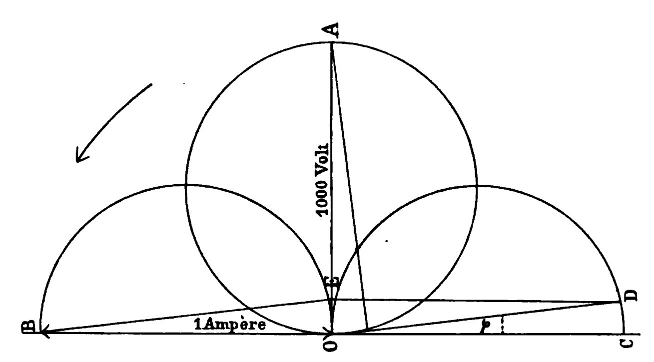


Fig. 30. Einem Zweige mit Kapazität ist ein zweiter Zweig parallel geschaltet, der Widerstand und Selbstinduktion enthält.

Zahlenbeispiel. Wir entnehmen ein lehrreiches Beispiel dem bekannten Werke von Bedell und Crehore, »Alternating Currents«, S. 336.

Der eine Zweig enthalte nur einen Kondensator, dessen Kapazität $C_1 = 1$ Mikrofarad ist, der andere parallele Zweig einen Widerstand von der Grösse $W_2 = 100$ Ohm und eine Spule mit Selbstinduktion, deren Selbstinduktionskoëffizient $L_2 = 1$ Henry ist. Die Grösse ω sei gleich 1000.

Der Kondensatorstromkreis enthalte keinen Widerstand, die Kapazität sei also durch kurze Kabelstücke an die Verzweigungsstellen angeschlossen. Der Kondensatorstrom $\overline{OB}$ (in Fig. 30) ist daher der treibenden EMK der Stromquelle um 90^0 voraus, die letztere $\overline{OA}$ betrage 1000 Volt.

Dann ist der Strom

$$\overline{OB} = C_1 \cdot E \cdot \omega = 10^{-6} \times 1000 \times 1000 = 1 \text{ Ampère.}$$

Die Tangente des Phasenverschiebungswinkels Θ_1, um den der den Widerstand und die Spule mit Selbstinduktion durchfliessende Strom OD hinter der EMK $\overline{OA}$ zurückbleibt, ist:

$$\operatorname{tang} \Theta_1 = \frac{L_2 \cdot \omega}{W_2} = \frac{1 \times 1000}{100} = 10$$

Der Strom $\overline{OD}$ bleibt daher beinahe um 90^0 hinter der EMK zurück und ist nahezu gleich $\overline{OC}$; $\overline{OC}$ aber ist:

$$\overline{OC} = \frac{E}{L_2\,\omega} = \frac{1000}{1 \times 1000} = 1 \text{ Ampère.}$$

Wir erhalten dann für die Resultante der beiden einzelnen Ströme, die nahezu einen Winkel von 180° mit einander einschliessen, den Wert OE, und

$$\overline{OE} = 0,1 \text{ Ampère}.$$

Der resultierende Strom beträgt also nur ungefähr den zehnten Teil jeder der beiden Komponenten.

Wir sehen also, dass man, wenn infolge hoher Selbstinduktion die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung sehr hoch ausfällt und die zur Hervorbringung einer bestimmten Arbeitsleistung erforderliche Stromstärke zu gross wird, durch Parallelschalten eines Kondensators von geeigneter Kapazität die Phasenverschiebung und die Stromstärke verkleinern kann. Wären Kondensatoren von grosser Kapazität nicht sehr kostspielig, so würde man in der Praxis gewiss öfters von diesem Hilfsmittel Gebrauch machen.

3. Kapitel.

Besondere Wirkungen der Wechselströme.

1. Glühlampen im Wechselstrombetriebe.

Der wesentliche Unterschied in dem Verhalten des Wechselstromes im Vergleich zum Gleichstrom, der darin besteht, dass ersterer in jeder Sekunde viele Male seine Richtung ändert und in seiner Stärke periodisch schwankt, während der Gleichstrom stetig mit gleicher Stärke in derselben Richtung fliesst, bedingt auch in den Wärmewirkungen ein etwas abweichendes Verhalten, obschon wir ja vorher festgestellt haben, dass wir einem Wechselstrome dann die gleiche effektive mittlere Stromstärke beilegen, die ein Gleichstrom von bestimmter Ampèrezahl besitzt, wenn beide Ströme in einem gegebenen induktionsfreien Widerstande die gleiche Wärmemenge erzeugen.

Hinsichtlich der Entwickelung von Stromwärme besteht somit zwischen beiden Stromgattungen kein Unterschied.

Die Glühlampen mit dünnen Fäden lassen bei niedriger Wechselzahl ein deutliches Flimmern erkennen. Während der Strom sinkt, durch Null hindurchgeht und allmählich wieder wächst, sinkt die Temperatur des Fadens infolge der Ausstrahlung, und die Lichtstärke nimmt merklich ab.

Bei ungefähr 30 bis 40 Perioden in der Sekunde ist dieser Temperatur- und Helligkeitsunterschied für das Auge selbst bei dünnen Fäden nicht mehr wahrnehmbar; bei Lampen mit dicken Kohlenfäden, wie sie z. B. bei Betrieb in Hintereinanderschaltung mit grösseren Stromstärken verwendet werden, ist schon bei geringer Wechselzahl für das Auge ein Flimmern nicht mehr zu erkennen, weil infolge der grösseren Masse die Temperatur der ausstrahlenden Oberfläche weniger tief sinkt.

Betrachten wir aber das Bild eines durch Wechselstrom ins Glühen gebrachten Kohlenfadens in einem rasch rotierenden Spiegel, so kann man deutlich helle und dunkle Stellen in dem leuchtenden Bande erkennen, als welches uns der glühende Faden im Spiegel erscheint. Es zeigt dies, dass die Temperatur des Kohlenfadens sich während einer Periode des Wechselstroms ändert.

Die Lichtmengen, die bei gleicher effektiver Spannung und Stromstärke eine Lampe bei Wechselstrombetrieb und bei Verwendung von Gleichstrom giebt, zeigen keine Unterschiede, da die Stromwärme die gleiche ist, und das Weniger in dem einen Abschnitte der Periode durch ein Plus in dem anderen ausgeglichen wird. Die Lebensdauer der Glühlampe soll bei Wechselstrom etwas höher sein, als bei Gleichstrom, weil bei letzterem die Austrittsstelle des Stromes aus dem Kohlenfaden etwas stärker durch Abschleuderung von Kohlenteilchen abgenutzt wird, als die Eintrittsstelle; der Unterschied dürfte jedoch, wenn er überhaupt vorhanden ist, nur sehr gering sein.

Von grossem Werte für viele Versuche mit Wechselstrom ist der Umstand, dass Glühlampen mit einfach hufeisenförmigen Kohlenfäden so gut wie keine Selbstinduktion besitzen. Glühlampen sind daher für induktionslose Belastung von Wechselstromapparaten besonders geeignet.

2. Das Wechselstrombogenlicht.

Zunächst erscheint es merkwürdig, dass der Lichtbogen einer Bogenlampe nicht erlischt, während die Stromstärke des Wechselstromes durch Null hindurch geht. Nachweisbar ist jedenfalls ein solches Abreissen nicht.

Da hoch erhitzte Gase und Dämpfe infolge ihrer lebhaften Molekularbewegung eine viel bessere elektrische Leitungsfähigkeit besitzen, als kalte Gase, so genügt schon eine mässige Spannung, um zwischen zwei weissglühenden Kohlenstäben den Übergang der Elektrizität durch einen kleinen Luftzwischenraum hindurch einzuleiten.

Um was für einen Vorgang es sich im Lichtbogen überhaupt handelt, ist zur Zeit noch nicht sicher bekannt. Jedenfalls spielt die Überführung elektrisch geladener Kohlenteilchen oder Gasmoleküle von der einen zur anderen Kohle eine wesentliche Rolle, so dass in Gasen mehr von einer Übertragung der Elektrizität von einer Elektrode zur anderen (Konvektion), als von einer Leitungsfähigkeit in dem Sinne, wie wir eine solche bei den Metallen beobachten, die Rede sein kann.

Dazu kommt, dass an den Stellen, an der Kohle und umgebende Gase sich berühren, wahrscheinlich elektromotorische Gegenkräfte thermoelektrischer Natur und sicher solche Gegenkräfte chemischen Ursprungs nach Art der Polarisation in den Zersetzungszellen sich entwickeln. Im Lichtbogen werden nämlich nicht nur durch die hohe Temperatur Zersetzungserscheinungen (Dissociationsvorgänge) hervorgerufen, sondern es treten auch chemische Veränderungen ein, die den Erscheinungen bei der Elektrolyse vergleichbar sind.

Vielleicht hängt mit dem Vorhandensein solcher elektromotorischer Gegenkräfte der Umstand zusammen, dass beim Wechselstrombogenlicht für den gleichen Verbrauch an elektrischer Arbeit im Verhältnis von 1,13 : 0,65 wenig an mittlerer Lichtstärke erzeugt wird, als bei Gleichstrom.

Während bei Gleichstrombogenlampen die positive Kohle sich durch den Lichtbogen kraterartig aushöhlt, bildet sich die negative Kohle zu einem spitzen Kegel aus (vergl. Fig. 31); der Abbrand der positiven Kohle ist dabei ungefähr doppelt so gross, als der der negativen Kohle. Bei Wechselstromlampen (vergl. Fig. 32) bilden beide

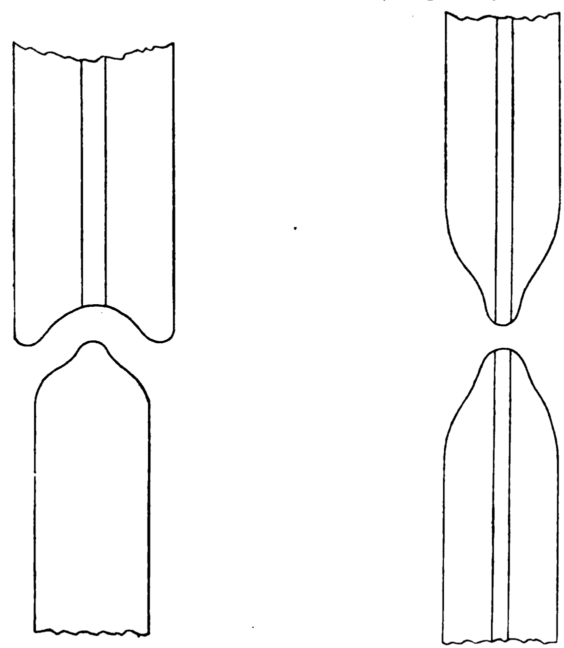


Fig. 31. Kohlen einer Gleichstrombogenlampe nach längerem Brennen.

Fig. 32. Kohlen einer Wechselstrombogenlampe nach längerem Brennen.

Kohlen schwach abgestumpfte Kegel und der Abbrand ist an beiden Kohlen fast völlig gleich.[1])

Die Temperatur der positiven Kohle ist bei Gleichstrom wesentlich höher, als die der negativen; bei Wechselstrom liegt für einen Unterschied keine Veranlassung vor.

Bei Gleichstromlampen macht man daher die positive Kohle fast stets zur oberen und lässt das Licht des Kraters nach unten werfen.

[1]) Da die obere Kohle durch den aufsteigenden Luftstrom stärker erwärmt wird, ist ihr Abbrand ungefähr 8% grösser, als der der unteren Kohle.

Um gleichen Abbrand in der Längsrichtung zu erzielen, macht man bei Gleichstrom die positive Kohle dicker, bei Wechselstrom werden beide Kohlen gleich stark gewählt.

Für Gleichstrom wird als obere Kohle eine Dochtkohle, d. h. eine Röhrenkohle, gewählt, deren Hohlraum mit einem weichen Graphit gefüllt ist, dem Kaliwasserglas beigemengt ist; als negative Elektrode wird ein homogener Kohlenstab gewählt, der mit einer Spur Borsäure imprägniert ist.

Beim Wechselstrombogenlicht werden in der Praxis fast ausschliesslich zwei Dochtkohlen verwendet.

Während die Gleichstrombogenlampe die grösste Helligkeit ungefähr in einer Richtung giebt, die unter einem Winkel von 40° unter der Horizontalen liegt, hat die Wechselstromlampe zwei solche Richtungen stärkster Lichtstrahlung, die je nach der Lichtbogenlänge mit der Horizontalen einen Winkel von 30° bis 50° einschliessen. Bei kurzem Lichtbogen sind diese Winkel kleiner, bei grossen Lichtbogenlängen grösser.

Die Spannungen, die zum gleichmässigen Erhalten des Lichtbogens erforderlich sind, hängen in beiden Fällen von der Länge des Lichtbogens, von der Stromstärke und von dem Material und der Dicke der Kohlen ab.

Nach O. Frölich lässt sich für konstante Stromstärke und dasselbe Kohlenpaar der Spannungsunterschied Δ zwischen beiden Kohlen durch die Formel $\Delta = a + \mathrm{b} \cdot \lambda$ . . . . 1) darstellen, worin a und b Konstanten und λ die Länge des Lichtbogens in *mm* bedeutet.

a scheint mit der Stromstärke wenig zu wachsen, b nimmt mit der Stromstärke ab.

Bei Gleichstrom liegen die Werte von a zwischen 27 und 50, die Werte von b zwischen 1,1 bis 17; bei Wechselstrom haben die Werte von a wesentlich geringere Werte, etwa 19 bis 25, während die Werte von b von gleicher Grössenordnung wie bei Gleichstrom sind.

Die mittlere effektive Spannung, die zum Betriebe einer Wechselstrombogenlampe erforderlich ist, fällt daher wesentlich geringer aus, als die zum Betriebe einer Gleichstromlampe von gleicher Stromstärke nötige Spannung.

Je nach der Einrichtung der Lampe muss die Klemmenspannung einer Wechselstromlampe etwa 26 bis 30 Volt,[1]) die einer Gleichstromlampe etwa 40 bis 47 Volt betragen.

---

[1]) Für eine Stromstärke von 4,4 A fand Heubach, wenn beide Kohlen Dochtkohlen waren: $\Delta = 19{,}8 + 2{,}2.\ \lambda$; bei einer Stromstärke von 6,5 A war $\Delta = 20{,}4 + 1{,}8.\ \lambda$.

Bei gleicher Stromstärke ist daher die Leuchtkraft einer Wechselstrombogenlampe, dem geringeren Wattverbrauche entsprechend, nur $^2/_3$ von der einer Gleichstrombogenlampe; im Verbrauche an Energie für gleiche Helligkeit besteht dagegen für die Praxis ein noch grösserer Unterschied.

Während man bei an den Verbrauchsleitungen verfügbaren Spannung von 110 Volt nur zwei Gleichstromlampen hinter einander schalten kann, ist es möglich drei Wechselstromlampen in Hintereinanderschaltung zu brennen. Es hat sich gezeigt, dass bei Verwendung von zwei Dochtkohlen zwischen Strom und Spannung kein Phasenunterschied auftritt, dass sich dagegen eine erhebliche positive Phasendifferenz einstellt, wenn eine oder beide Kohlen homogene sind.

Das Flimmern der Bogenlampen, infolge der Abkühlung der Kohlen während des Durchganges des Stromes durch Null, macht sich noch bei 40 Perioden in 1 Sekunde in höchst lästiger Weise geltend und ist selbst bei 60 Perioden dem Auge noch bemerkbar. Wenn man aber, wie dies zuerst von Helios (in Ehrenfeld-Köln) geschehen ist, eine weisse reflektierende Scheibe über dem Lichtbogen anbringt, erhält man, auch wenn die untere Kohle positiv ist, einen so starken Lichtreflex, dass das Auge von den Helligkeitsschwankungen wenig mehr bemerkt, zumal wenn ausserdem die Kohlen noch von einer matten Glasglocke umgeben sind. Schnell bewegte, zumal glänzende Gegenstände, wie z. B. Radspeichen, erscheinen aber im Wechselstrombogenlicht stets vielfach.

Infolge der rasch wechselnden Erwärmung und Abkühlung der Kohlenspitzen werden die benachbarten Luftmengen in dem doppelten Takte der Periode des Wechselstromes ausgedehnt und wieder zusammen gezogen. Das Wechselstrombogenlicht lässt daher immer einen Ton oder wenigstens ein Geräusch hören. Hat die Kurve, nach der sich der Strom als Funktion der Zeit ändert, ziemlich genau die Form einer Sinuslinie (Sinoide), so ist der Ton von verhältnismässig geringer Stärke und ziemlich musikalisch rein. Ist die Stromkurve dagegen stark verzerrt, zeigt sie ziemlich ausgeprägte Spitzen und Zacken, so tritt ein schnarrendes Nebengeräusch auf. Bei grossen Stromstärken macht sich ein kräftiges Brummen hörbar; ist gleichzeitig der Lichtbogen lang und die Periodenzahl hoch, so ähnelt der vom Wechselstromlichtbogen erzeugte Ton dem einer Trompete.

Manchmal gesellt sich, zumal bei nicht sehr sorgfältig zubereiteten Dochtkohlen, noch ein klatschendes bis schnatterndes Geräusch hinzu, das den summenden Ton begleitet.

Durch die Lampenglocken, mit denen man den Lichtbogen umgiebt, werden diese Geräusche stark gemildert, aber nur bei sehr

nahe sinoidaler Form der Stromkurven gelingt es, sie so abzudämpfen, dass sie nicht gelegentlich störend wirken können.

Aus alledem erkennt man, dass für Strassenbeleuchtung, Konzertsäle und überall da, wo es hauptsächlich auf eine Lichtwirkung von oben nach unten, oder auf möglichste Lautlosigkeit der Lampen ankommt, der Gleichstrom dem Wechselstrom vorzuziehen ist.

In Theatern, in denen auch eine gute Deckenbeleuchtung mit erzielt werden soll, in Schaufenstern, in denen es auf eine möglichst gleichförmige Verteilung des Lichtes nach allen Seiten hin ankommt, kann unter Umständen der Wechselstrom den Vorzug verdienen, zumal wenn man berücksichtigt, dass überhaupt die Teilbarkeit des Wechselstromes für Beleuchtungszwecke etwas grösser ist, als die des Gleichstromes.

3. Chemische Wirkungen des Wechselstromes.

Da die Stromrichtung bei dem Wechselstrome fortwährend sich umkehrt, sind elektrolytische Prozesse, wie sie der Gleichstrom hervorbringt, unmöglich.

Geht der Strom in einer bestimmten Richtung durch eine Zersetzungszelle, so wird die eine Elektrode Anode, und an ihr scheidet sich das Anion aus, die andere Elektrode ist Kathode, und an ihr wird das Kation frei. Kehrt der Strom nunmehr seine Richtung um, so vertauschen die Elektroden ihre Vorzeichen. Es treten somit an beiden Elektroden beide Ionen auf. Erfolgt nun der Stromwechsel in genügend kurzer Zeit, so befinden sich beide Ionen noch im status nascens und in räumlicher Nähe, sie vereinigen sich wieder.

Die EMK der Polarisation verschwindet dabei, die Arbeit der elektrolytischen Verlegung wird Null, und es tritt nun eine Erwärmung der Elektrolyten nach Massgabe des Joule'schen Gesetzes ein.

Bei niedriger Frequenz treten meist an jeder Elektrode beide Ionen auf.

Wenn man z. B. einer Wasserzersetzungszelle starken Wechselstrom von nicht zu hoher Periodenzahl zuführt, so wird an beiden Elektroden Knallgas entwickelt, aber eine viel geringere Menge, als Gleichstrom von gleicher Stärke erzeugen würde.

Wohl giebt es eine Reihe von chemischen Verbindungen mit sogenannter unipolarer elektrischer Leitungsfähigkeit, die die Eigenschaft haben, den Strom besser in der einen, als in der anderen Richtung durchzulassen, wenn sie zwischen geeignete Elektroden gebracht werden; die diesbezüglichen Untersuchungen sind aber bis jezt so wenig abgeschlossen, dass es nicht zweckmässig erscheint, an dieser Stelle auf diese theoretisch sehr interessanten Vorgänge näher einzugehen.

Wechselstrom kann daher für elektrolytische Zwecke im allgemeinen **nicht** verwendet werden. Man kann im besonderen mit ihm keine Akkumulatoren laden und ihn nicht in der Form chemischer Anziehungskraft aufspeichern.

Praktische Verwendung in der Elektrotechnik hat dagegen die Thatsache gefunden, dass Zersetzungszellen, die in einen Wechselstromkreis eingeschaltet werden, eine sehr erhebliche Kapazität infolge der auftretenden und verschwindenden Polarisation der Elektroden zeigen. — Man benutzt daher solche Flüssigkeitskondensatoren mit Erfolg, um Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung, ähnlich wie durch Kondensatoren, hervorzurufen.

Diese elektrolytischen Kondensatoren besitzen schon bei mässiger Ausdehnung erhebliche Kapazität; sie erwärmen sich beim Gebrauche wenig, so dass auch der Energieverbrauch in ihrem Innern nicht erheblich zu sein scheint.[1])

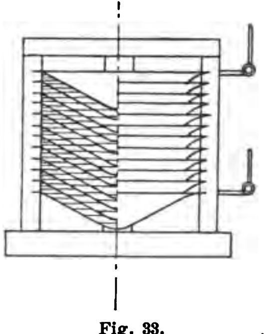


Fig. 33.
Elektrolytischer Kondensator für Wechselströme.

Will man Wechselstrom für die Hervorbringung chemischer Prozesse verwenden, so muss er entweder in intermittierenden Gleichstrom durch einen Stromwender (Gleichrichter genannt) verwandelt werden; oder man muss den Wechselstrom zunächst zum Betriebe eines Motors verwenden, durch diesen eine Gleichstrommaschine in Bewegung setzen und deren Strom zur Erzeugung des chemischen Prozesses verwenden.

Sowohl das Gleichrichten von Wechselstrom, als die Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom durch Verbindung eines Wechselstrommotors mit einer Gleichstrommaschine ist immer mit erheblichen, unvermeidlichen Verlusten verknüpft. Ist jedoch die elektrische Energie gerade in der Form von Wechselstrom aus besonderen Gründen billig zu erlangen, so kann immerhin die ursprüngliche Erzeugung von Wechselstrom und die Umformung desselben in Gleichstrom wirtschaftlich zweckmässig erscheinen. Es giebt eine grössere Zahl von Elektrizitätswerken, bei denen ursprünglich Wechselstrom erzeugt und weithin fortgeleitet, an dem Verbrauchsort wieder in Gleichstrom umgewandelt und als solcher den Konsumenten zugeführt wird.

---

[1]) Solche elektrolytische Kondensatoren bestehen zumeist aus einer Reihe von isoliert über einander aufgestellten schalenartigen Blechgefässen, zwischen denen sich Natronlauge befindet, so dass die Flüssigkeit der einen Schale die Unterseite der darüber befindlichen Schale benetzt (vergl. Fig. 33).

4. Gleichrichter für Wechsels·

Um Wechselstrom in einen intermittierenden wandeln, genügt es, auf die Achse eines kleinen der mit dem Stromerzeuger in genau gleichem läuft, einen Stromwender aufzusetzen und die Gleichstrom zu entnehmen.

Die einzelnen Segmente eines solchen einander is unter sich Achse befin und von ei ringen verb strom zug

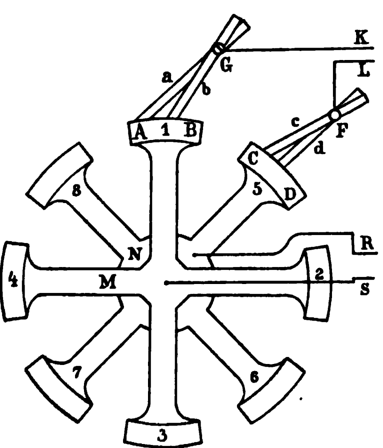


Fig. 34. Einrichtung des Pollak'schen Gleichrichters für Wechselströme.

Die n läutert die Kommuta bilden di auf geei Schleifri sind di liegende mit de leitende den ers

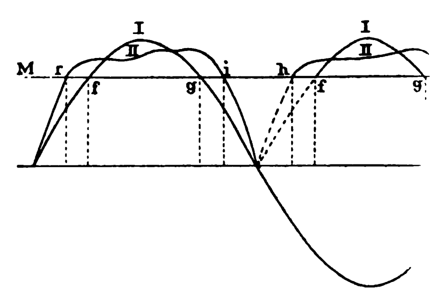
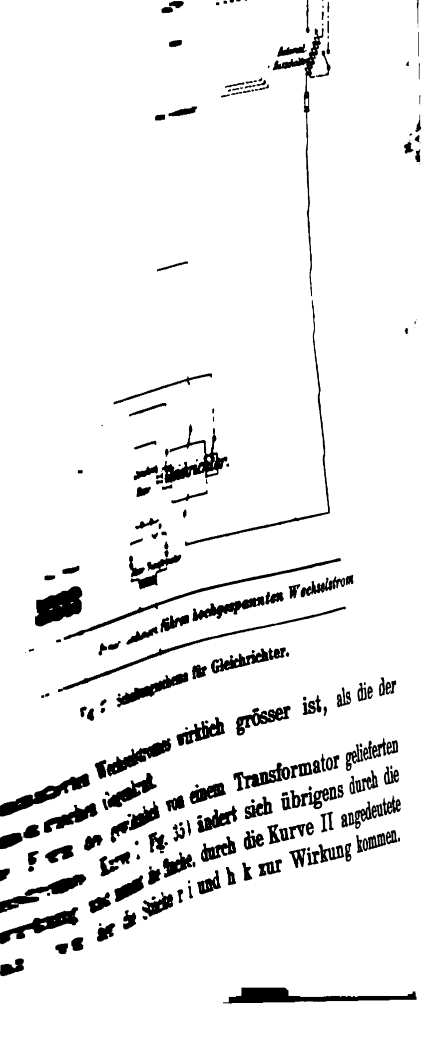


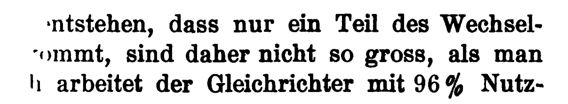
Fig. 35. Wechselstrom am Gleichrichter

eine isolierende Zwischenschicht getre der Kommutatorsegmente sind so g zwischenräume unterbrochene Cylind

Durch die Leitungen R und S w Wechselstrom zugeführt.

Zur Abnahme des Gleichstrome c d. Die Entfernung der Enden





ntstehen, dass nur ein Teil des Wechsel-
ommt, sind daher nicht so gross, als man
h arbeitet der Gleichrichter mit 96 % Nutz-

haltung eines zum Laden von Akkumula-
ichters, der von einem Transformator aus
st wird. Die Primärwickelung des Trans-
gespannten Wechselstrom. Unterbrochener
ichrichter an eine Batterie, an Lampen und
otoren abgegeben.
Gleichrichter ist sehr einfach, indem sie
bedarf und nur sehr wenig Raum bean-
ng der Gleichrichter ist ebenfalls eine sehr
nicht mehr Aufmerksamkeit, als die einer

unterscheidet sich der vom Gleichrichter ge-
rheblich. Es scheint sogar bei seiner Ver-
tischen Zersetzung eine gewisse Erhöhung oder
Wirkung einzutreten. Die genauen Unter-
cheinung werden vielleicht noch zu wertvollen

en Anzahl von zum Teil ausgedehnten Wechsel-
ich der Pollak'sche Gleichrichter bisher gut

netische Kreisprozesse, Hysteresis.

n in den Grundzügen der Elektrotechnik (Kap. IV,
hingewiesen, dass, wenn ein zunächst unmag-
sen von Null anfangend, allmählich wachsenden
räften unterworfen wird, die magnetische Induktion
h wächst und von einer gewissen Stärke der
kenden (magnetomotorischen) Kraft an nur noch
mt.
8, die wir aus den Grundzügen reproduzieren,
ve OA dieser Zustandsänderung des Eisens. Als
magnetomotorischen Kräfte, als Ordinaten die in
ng der Kraftlinien senkrecht gelegenen Quadrat-
ene Anzahl von Kraftlinien aufgetragen.
ierauf den Strom in der magnetomotorisch wirken-
lich an Stärke abnehmen lässt, so nimmt auch die
uktion im Eisen wieder ab, und zwar, während die
Null sinkt, längs der Kurvenstücken AC. Lässt

4. Gleichrichter für Wechselstrom.

Um Wechselstrom in einen intermittierenden Gleichstrom zu verwandeln, genügt es, auf die Achse eines kleinen Wechselstrommotors, der mit dem Stromerzeuger in genau gleichem Takte, also synchron, läuft, einen Stromwender aufzusetzen und diesem durch Bürsten den Gleichstrom zu entnehmen.

Die einzelnen Segmente eines solchen Kommutators sind von einander isoliert und abwechselnd unter sich und mit zwei auf der Achse befindlichen, von der Achse und von einander isolierten Schleifringen verbunden, denen der Wechselstrom zugeführt wird.

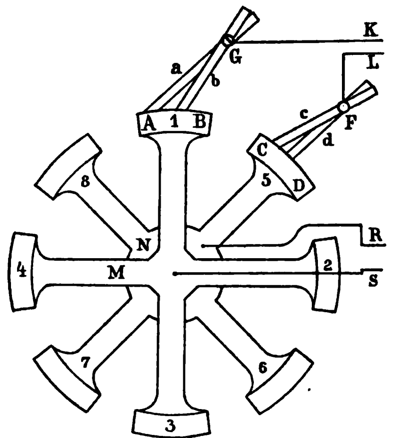


Fig. 34. Einrichtung des Pollak'schen Gleichrichters für Wechselströme.

Die nebenstehende Figur 34 erläutert die Einrichtung eines solchen Kommutators. Die Arme 1, 2, 3, 4 bilden die einen Segmente, sie sind auf geeignete Weise mit dem einen Schleifringe verbunden; 5, 6, 7, 8 sind die abwechselnd dazwischen liegenden Segmente, die ihrerseits mit dem anderen Schleifringe in leitender Verbindung stehen und von den erstgenannten Segmenten durch eine isolierende Zwischenschicht getrennt sind. Die äusseren Flächen der Kommutatorsegmente sind so gestaltet, dass eine durch Luftzwischenräume unterbrochene Cylinderfläche entsteht.

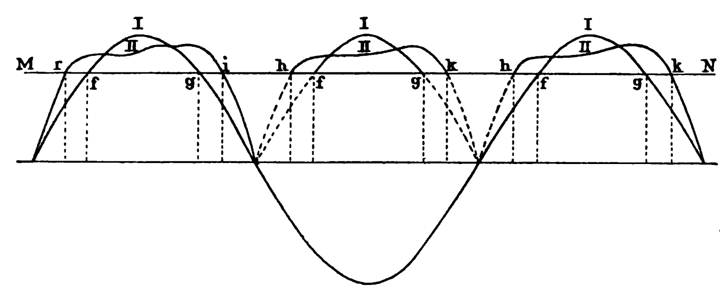


Fig. 35. Wechselstrom am Gleichrichter beim Laden von Akkumulatoren.

Durch die Leitungen R und S wird den beiden Segmentgruppen Wechselstrom zugeführt.

Zur Abnahme des Gleichstromes dienen Bürstenpaare a b und c d. Die Entfernung der Enden der unter einander verbundenen

gleichnamigen Bürsten kann nach Bedarf geregelt werden. Erfolgt der Übergang der Bürste b auf das Segment 5 bei C gleichzeitig mit dem Übergange der Bürste d auf das Segment 2 und in demselben Augenblicke, in dem die Bürste a das Segment 1 bei B und die Bürste c das Segment 5 bei D verlässt, geschieht dieser Wechsel ferner in dem Zeitpunkte, in dem der Wechselstrom durch Null hindurch geht, so vollzieht sich der Richtungswechsel des Stromes an den Bürsten ohne nennenswerte Funkenbildung an den Auflagestellen.

Für gewöhnlich soll gleichgerichteter Wechselstrom aber zum Laden von Akkumulatoren oder zum Betriebe von Gleichstrommotoren dienen. Beide entwickeln eine gewisse elektromotorische Gegenkraft, z. B. von der Grösse MN in Fig. 35. Dann würde, wenn man einfach den vollen intermittierenden Gleichstrom benutzen wollte, in der Zeit, während die Spannungskurve sich unterhalb der Linie MN befindet, die elektromotorische Gegenkraft überwiegen und einen in entgegengesetzter Richtung fliessenden Strom veranlassen.



Fig. 36.
Gleichrichter von Pollak.

Der Kommutator muss daher derart eingerichtet werden, dass nur die über der Linie MN liegenden Teile f g der Spannungskurve zur Wirksamkeit kommen. Da ausserdem z. B. beim Laden von Akkumulatoren die Spannungslinie MN um so höher hinauf rückt, je mehr die Ladung sich ihrem Abschlusse nähert, so muss die Zeit, während der der kommutierte Wechselstrom innerhalb einer vollen Periode zur Wirksamkeit kommt, verändert werden können.

Man muss den Strom gerade zu dem Zeitpunkte zu wirken anfangen lassen, zu dem die Spannung in der Kurve der Gegenspannung gleich ist. Nur wenn diese Forderung erfüllt ist, wird die Funkenbildung ein Minimum werden.

Der Gleichrichter von G. Pollak, der in Fig. 36 abgebildet ist, erfüllt diese Bedingung in durchaus befriedigender Weise. Derselbe wird von einem kleinen Synchronmotor angetrieben, der durch einen kleinen Transformator den zu seinem Betriebe erforderlichen Wechselstrom geliefert erhält. Die Bürsten sind zunächst im ganzen drehbar; ausserdem kann der Winkel zwischen den gleichnamigen Bürsten zwischen a und b, beziehentlich zwischen c und d (Fig. 34)

verändert werden. Man kann daher durch Verschiebung der Stellung der Bürstenpaare auf den Segmenten und durch Änderung der Zeitdauer, während der Strom entnommen wird, also durch Veränderung des Winkels, den die gleichnamigen Bürsten einschliessen, es dahin bringen, dass nur so lange Strom entnommen wird, als die EMK

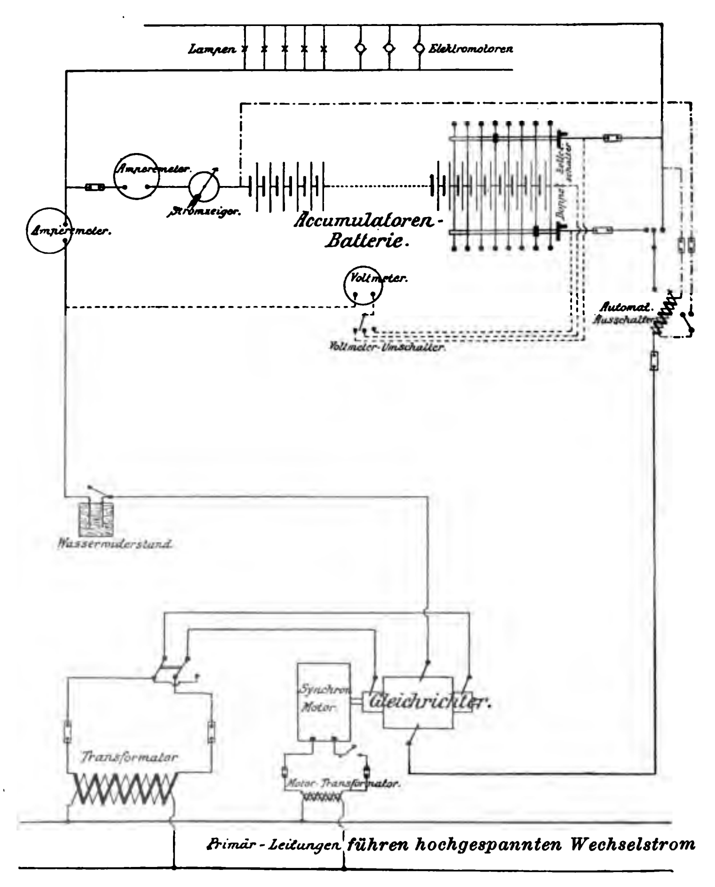


Fig. 37. Schaltungsschema für Gleichrichter.

des kommutierten Wechselstromes wirklich grösser ist, als die der elektromotorischen Gegenkraft.

Die Form des gewöhnlich von einem Transformator gelieferten Wechselstromes (Kurve I, Fig. 35) ändert sich übrigens durch die Gegenwirkung und nimmt die flache, durch die Kurve II angedeutete Form an, von der die Stücke r i und h k zur Wirkung kommen.

Die Verluste, die dadurch entstehen, dass nur ein Teil des Wechselstromes zur Verwendung kommt, sind daher nicht so gross, als man erwarten sollte. Angeblich arbeitet der Gleichrichter mit 96 % Nutzeffekt.

Fig. 37 zeigt die Schaltung eines zum Laden von Akkumulatoren bestimmten Gleichrichters, der von einem Transformator aus mit Wechselstrom gespeist wird. Die Primärwickelung des Transformators empfängt hochgespannten Wechselstrom. Unterbrochener Gleichstrom wird vom Gleichrichter an eine Batterie, an Lampen und an Gleichstrom-Elektromotoren abgegeben.

Eine Anlage mit Gleichrichter ist sehr einfach, indem sie keiner Fundamentierung bedarf und nur sehr wenig Raum beansprucht. Die Bedienung der Gleichrichter ist ebenfalls eine sehr einfache und erfordert nicht mehr Aufmerksamkeit, als die einer Dynamomaschine.

Vom Gleichstrom unterscheidet sich der vom Gleichrichter gelieferte Strom nicht erheblich. Es scheint sogar bei seiner Verwendung zur elektrolytischen Zersetzung eine gewisse Erhöhung oder Beschleunigung der Wirkung einzutreten. Die genauen Untersuchungen dieser Erscheinung werden vielleicht noch zu wertvollen Ergebnissen führen.

Bei einer grösseren Anzahl von zum Teil ausgedehnten Wechselstromanlagen hat sich der Pollak'sche Gleichrichter bisher gut bewährt.

5. Magnetische Kreisprozesse, Hysteresis.

Wir haben schon in den Grundzügen der Elektrotechnik (Kap. IV, 16., S. 72) darauf hingewiesen, dass, wenn ein zunächst unmagnetisches Stück Eisen von Null anfangend, allmählich wachsenden magnetisierenden Kräften unterworfen wird, die magnetische Induktion ebenfalls allmählich wächst und von einer gewissen Stärke der magnetisierend wirkenden (magnetomotorischen) Kraft an nur noch wenig mehr zunimmt.

In der Fig. 38, die wir aus den Grundzügen reproduzieren, entspricht die Kurve OA dieser Zustandsänderung des Eisens. Als Abscissen sind die magnetomotorischen Kräfte, als Ordinaten die in einem zur Richtung der Kraftlinien senkrecht gelegenen Quadratzentimeter enthaltene Anzahl von Kraftlinien aufgetragen.

Wenn man hierauf den Strom in der magnetomotorisch wirkenden Spule allmählich an Stärke abnehmen lässt, so nimmt auch die magnetische Induktion im Eisen wieder ab, und zwar, während die Stromstärke bis Null sinkt, längs der Kurvenstücken AC. Lässt

man nun einen von Null an beginnenden, an Stärke zunehmenden Strom in entgegengesetzter Richtung durch die magnetisierend wirkende Spule fliessen, so bedarf es schon einer nicht unerheblichen magnetomotorisch wirkenden Kraft von der Grösse OD, um das Eisenstück wieder völlig unmagnetisch zu machen.

Lässt man die im entgegengesetzten Sinne wirkenden magnetisierenden Kräfte noch weiter wachsen, so nähert sich die Zahl der

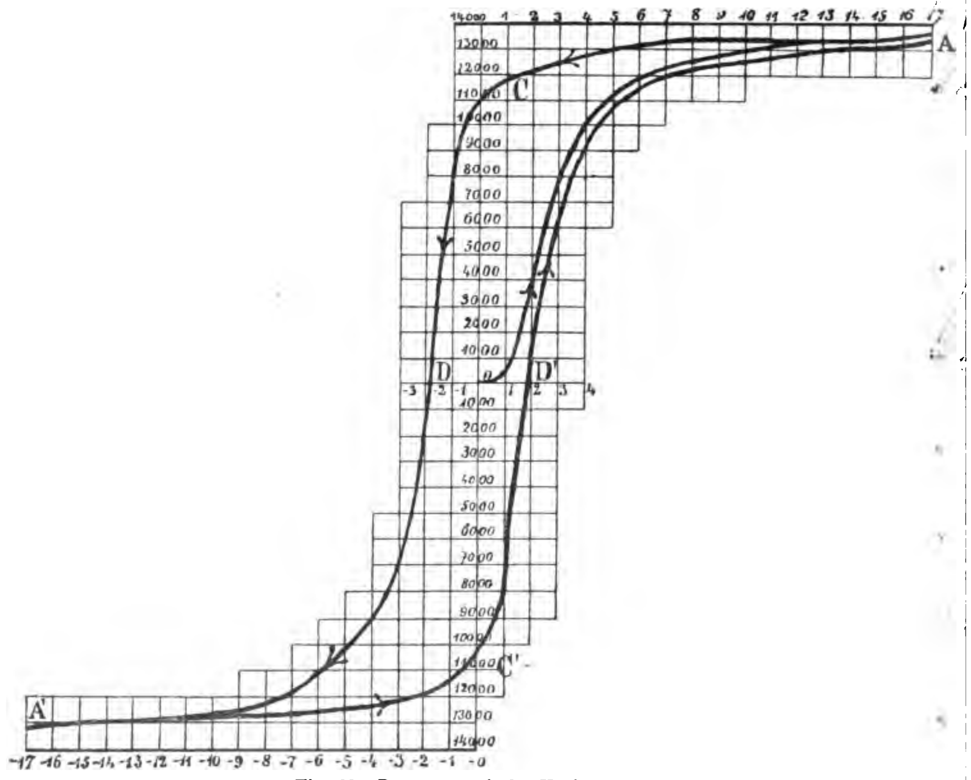


Fig. 38. Der magnetische Kreisprozess.

entgegengesetzt gerichteten Kraftlinien wieder mehr und mehr der früher erhaltenen Zahl.

Lässt man nunmehr wiederum die Stärke des magnetisierend wirkenden Stromes sinken, so nimmt auch die Kraftlinienzahl wieder längs des Kurvenstückes A′C′ ab. Wenn der Strom Null geworden ist, ist noch die durch die Ordinate OC′ gemessene, entgegengesetzt gerichtete Anzahl Kraftlinien vorhanden.

Erst wenn wieder ein elektrischer Strom in der ursprünglichen

Richtung fliesst, so dass seine magnetomotorische Wirkung durch OD′ gemessen wird, ist das Eisen wieder unmagnetisch geworden. Lässt man den Strom noch in demselben Sinne weiter wachsen, so kommt man wieder auf den früheren Wert der magnetischen Induktion bei Punkt A zurück.

In dieser hier gezeichneten Figur liegt A so hoch über, als A′ unter der Abscissenlinie, und es ist ferner OC′ = OC und OD′ = OD.

Das Eisen hat auf dem Wege ACD A′C′D′A einen vollständigen magnetischen Kreisprozess durchlaufen.

Es ist klar, dass, wenn eine magnetisierend wirkende Spule von einem Wechselstrome durchflossen wird, für jede Periode des Wechselstromes ein in der Spule befindliches Eisenstück einmal einen solchen

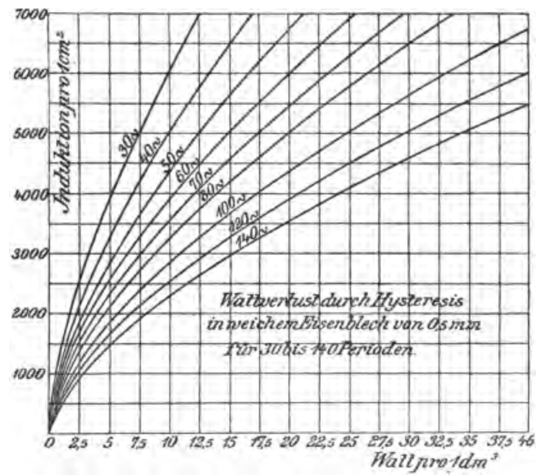


Fig. 39.

magnetischen Kreisprozess durchlaufen wird, dass also in 1 Sekunde das Eisen so viele mal nach einander einem solchen Kreisprozesse unterworfen wird, als die Periodenzahl des Wechselstromes angiebt.

Die von den Kurven eingeschlossene Fläche misst die zur Hervorbringung eines solchen Kreisprozesses erforderliche Arbeitsmenge, die als Erwärmung der Masse des Eisens in Erscheinung tritt.

Der Vorgang selbst führt, wie bereits früher erwähnt, den Namen Hysteresis.

Wir sehen, dass zur Überwindung der Hysteresis der Eisenkerne von Magneten, deren magnetisierende Spule von einem Wechselstrom durchflossen wird, ein Arbeitsaufwand erforderlich ist, der der Frequenz des Wechselstromes und dem Flächeninhalte der Schleife AC′A′C direkt proportional ist.

Durch sehr sorgfältige Untersuchungen hat Steinmetz den Arbeitsverbrauch durch Hysteresis bestimmt und gefunden, dass derselbe in seiner Abhängigkeit von der Kraftliniendichte durch die empirische Formel

$$A_H = \eta \cdot B_{max}^{1,6} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

dargestellt werden kann. A_H ist der Arbeitsverlust in absoluten

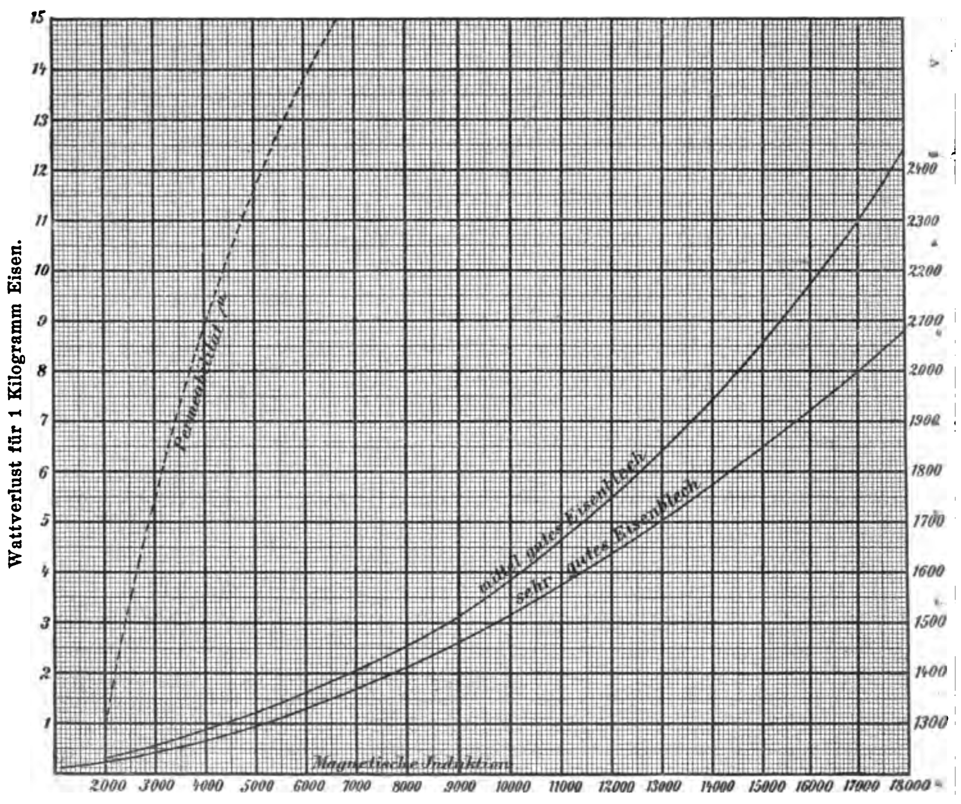


Fig. 40. Wattverlust durch Hysteresis für $\sim = 100$, und Permeabilität des Eisens in ihrer Abhängigkeit von der magnetischen Induktion.

Arbeitseinheiten für 1 *ccm* Eisen, B_{max} die höchste Felddichte, die im Kreisprozesse erreicht wird, η ist eine Konstante, deren Wert je nach der Eisensorte zwischen 0,0016 und 0,0043 liegt. Für vorzügliches Eisenblech, wie es nur selten zum Aufbau von Wechselstromapparaten zur Verfügung steht, setzt man etwa $\eta = 0{,}00175$, für mittelgutes $\eta = 0{,}0023$. In vorstehendem Diagramm Fig. 39[1])

[1]) Von E. Kolben herrührend.

sind die Arbeitsverluste durch Hysteresis für verschiedene Periodenzahlen ausgedrückt in Watt, bezogen auf 1 Kubikdezimeter Eisen in ihrer Abhängigkeit von der Feldstärke dargestellt.

Da die Hysteresisverluste dem Gewichte des Eisens direkt proportional sind, so kann man mit Hilfe dieses Diagramms in jedem Falle die Grösse des Verlustes in Watt ermitteln.

Für die Wechselzahl $\sim = 100$ enthält die nebenstehende Figur[1]) (Fig. 40) die Hysteresisverluste in Watt, bezogen auf 1 *kg* Eisen. Die obere Kurve gilt für mittelgutes, die untere für vorzügliches Material.

Die ausserdem eingezeichnete gestrichelte Linie giebt für dieselben Werte der magnetischen Induktion in obigen Eisensorten den Betrag der magnetischen Permeabilität (vergl. Grundzüge der Elektrotechnik IV, 14., S. 68, Gl. 9); es ist dies eine Grösse, deren man oft bedarf, wenn man die magnetischen Widerstände des mittleren Weges von Kraftlinien berechnen will.

6. Wirbelströme.

In jeder Metallmasse eines Wechselstromapparates entstehen und verschwinden, der Periode der Wechselströme folgend, Kraftlinien. Jede Änderung der Kraftlinienzahl aber ruft bekanntlich in Leitern Induktionsströme hervor. Ein Wechselstrom übt daher auf jede in seiner Nähe befindliche Leitermasse eine induzierende Wirkung aus.

Da für eine gegebene magnetomotorische Kraft im Eisen besonders viele Kraftlinien erzeugt werden, müssen diese induzierenden Wirkungen sich hauptsächlich in Eisenteilen geltend machen, in deren Nähe Wechselströme fliessen, und ganz besonders stark müssen solche Induktionsströme in den Kernen der Elektromagneten auftreten, durch deren Spulen ein Wechselstrom fliesst.

Diese Ströme werden in zusammenhängenden Eisenmassen ausserordentliche Stärken erreichen können, weil der Ohm'sche Leitungswiderstand solcher zusammenhängender Metallmassen gering ist.

Diese Ströme, Wirbelströme genannt, erzeugen in den Körpern, in denen sie fliessen, Stromwärme, natürlich auf Kosten der Energie des Wechselstromes, dem sie ihre Entstehung verdanken. Wenn der Wechselstrom aber nach Einschaltung einer Strombahn, die in benachbarten Metallteilen Wirbelströme erzeugt, dieselben sonstigen Wirkungen, wie vorher, hervorbringen soll, muss er verstärkt werden. Auch die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und

---

[1]) Nach G. Kapp.

Spannung des Wechselstromes wird durch die Rückwirkung der Wirbelströme auf den sie erzeugenden Strom verkleinert.

Will man also beträchtliche Energieverluste und schädliche Wärmeentwicklungen vermeiden, so muss man die Entstehung von Wirbelströmen so weit als irgend möglich vermeiden. Es müssen also Metallmassen, in deren unmittelbaren Nähe Wechselströme verlaufen, aus einzelnen von einander isolierten Teilen zusammen gesetzt werden.

Die Eisenkerne der Wechselstrommagneten im besonderen müssen derart aus Blechen oder Drähten aufgebaut werden, dass die magnetischen Kraftlinien in ihnen ungehindert verlaufen können, während der Entstehung von Wirbelströmen vorgebeugt wird. Es geschieht dies zumeist in der Weise, dass man die Eisenkörper aus Blechen bildet, deren Längsrichtung mit der Richtung der Kraftlinien zusammenfällt, während man in der dazu senkrechten Richtung die Bleche durch dünne Zwischenlagen von Papier oder durch Lack von einander isoliert.

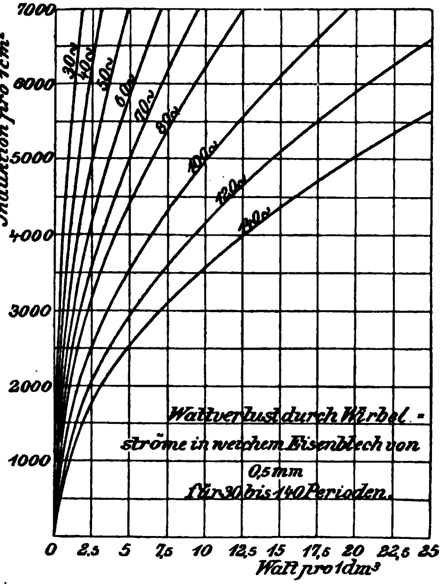


Fig. 41.

Um in dicken Kupferleitungen der Entstehung von Wirbelströmen vorzubeugen, setzt man dieselben aus mehreren von einander isolierten Adern zusammen. Schon ein Lacküberzug, eine Oxydschicht genügt zumeist, um die Wirbelströme auf eine so geringe Stärke herabzumindern, dass ihre Wirkung in der Praxis vernachlässigt werden kann.

Die Stromstärke der Wirbelströme ist, wie sich aus den Induktionsgesetzen ergiebt, der Wechselzahl und einem Koëffizienten proportional, von dem die wechselseitige Induktion der in Betracht kommenden Leiterteile abhängt.

Da die durch die Wirbelströme entwickelte Stromwärme dem Quadrate der Stromstärke proportional ist, so ist hiernach die von den Wirbelströmen entwickelte Wärmemenge dem Quadrate der Anzahl der Perioden des Wechselstromes proportional und abhängig von der Unterteilung des Materiales.

Für 1 *ccm* weiches Eisen, das aus von einander isolierten Blechen von 0,5 *mm* Dicke zusammen gesetzt ist, beträgt nach Ewing der Arbeitsverlust durch Wirbelströme A_W

$$A_W = 0{,}004 \cdot \sim^2 \cdot B_{max}^2 \cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

wenn A_W in Watt und B_{max} in absoluten Einheiten ausgedrückt wird.

Für den in der Praxis sehr häufig vorkommenden Fall, dass die Blechstärke 0,5 *mm* beträgt, hat E. Kolben[1]) die Wattverluste als Funktion der magnetischen Induktion für verschiedene Wechselzahlen graphisch dargestellt.

In Fig. 41 ist dieses Diagramm Kolbens reproduziert. Für praktische Zwecke ist es zweckmässig, gleich den gesamten Verlust, der im Eisen von Wechselstrom-Apparaten durch Hysteresis und

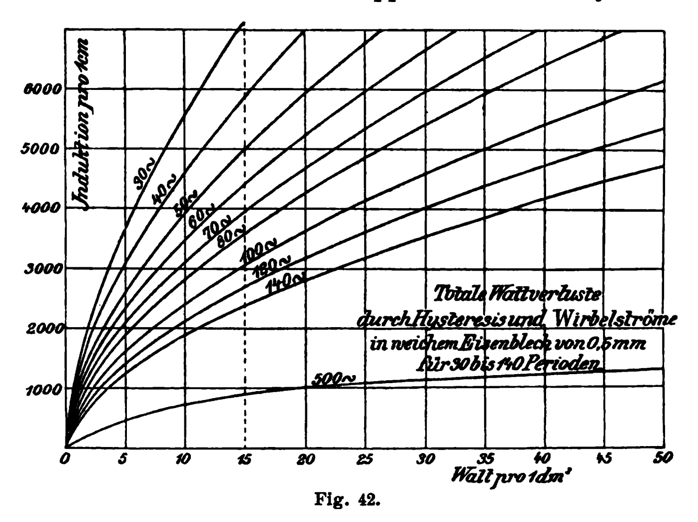


Fig. 42.

durch Wirbelströme entsteht, zusammen zu fassen, und dies ist für Eisenblech von 0,5 *mm* Dicke in dem ebenfalls von Kolben herrührenden Diagramm, Fig. 42, geschehen.

7. Einfluss der Blechstärke auf die Wirbelströme.

Die Wirbelströme wirken auch ungünstig auf die Magnetisierung des Eisens zurück, ein Grund mehr, das Eisen in einer zum Verlaufe der Kraftlinien senkrechten Richtung möglichst sorgfältig zu blättern, d. h. möglichst dünne Bleche zu verwenden.

Die EMK der induzierten Wirbelströme ist um nahe 180^0 gegen die EMK des sie erzeugenden Wechselstromes verschieden. Die von

[1]) E. T. Z. 1894. S. 77.

den Wirbelströmen erzeugten Kraftlinien vernichten somit einen Teil der vom Wechselstrom erzeugten Linien. Die Wirbelströme wirken aber nicht gleichmässig schwächend auf der ganzen Dicke des Eisenbleches, sondern sie schwächen vorzugsweise die im Innern des Eisens verlaufenden Kraftlinien, weil auf diese alle Wirbelströme einwirken, während auf die an der Oberfläche gelegenen nur ein Teil der Wirbelströme einwirkt.

Durch die Wirbelströme wird also eine ungleichmässige Verteilung der Kraftlinien im Eisenblech hervorgerufen, die Linien drängen sich an der Oberfläche zusammen, dort ist ihre Dichte grösser, in der Mitte fliessen wenig oder bei dicken Blechen gar keine der vom Wechselstrom erzeugten Kraftlinien.

Der Querschnitt des Kraftlinienstromes wird daher scheinbar verkleinert, die mittlere Dichte desselben vergrössert, es bedarf also zur Erzeugung derselben Zahl von Kraftlinien einer stärkeren magnetomotorischen Kraft, d. i. einer grösseren Zahl von Ampèrewindungen, wenn merkliche Wirbelströme vorhanden sind. Die wirksame Plattendicke, d. h. die Plattendicke, die bei gleichförmig dichter Magnetisierung dieselbe Linienzahl führen würde, beträgt nach Ewing für 100 Perioden in 1 Sekunde:

bei	∞	dicker	Platte:	$2 \times 0{,}252$ *mm*
»	2 *mm*	»	» :	$2 \times 0{,}250$ »
»	1,5 »	»	» :	$2 \times 0{,}256$ »
»	1,0 »	»	» :	$2 \times 0{,}282$ »
»	0,75 »	»	» :	$2 \times 0{,}285$ »
»	0,5 »	»	» :	$2 \times 0{,}233$ »
»	0,25 »	»	» :	$2 \times 0{,}124$ »

Man sieht, dass bei $^1/_4$ *mm* dicken Eisenplatten die Schirmwirkung der Wechselströme vernachlässigt werden kann und dass sie schon bei 0,5 *mm* dicken Eisenblechen sehr gering ist.

Da nun die Herstellung eines Eisenkörpers um so kostspieliger wird, je dünner die dazu verwendeten Eisenbleche sind, und die Raumausnutzung wegen der isolierenden Zwischenschichten sich um so ungünstiger gestaltet, so werden in der Praxis zum Aufbau der Kerne der Wechselstromapparate meist weiche Eisenbleche von 0,5 *mm*, nur selten noch dünnere Bleche verwendet.

8. Magnetisierungskurven für Eisenblech, Flusseisen, Schmiedeeisen und Gusseisen.

Da die Zahl von Kraftlinien, die eine gegebene magnetomotorische Kraft im Eisen erzeugt, nicht nur von der chemischen Beschaffenheit des Eisens, sondern auch von seiner mechanischen Herstellungsweise abhängt, so müssen wir für weiches Eisenblech, wie es zur

Tafel

66c

Ampèrewindungen für 1 *cm*. Weglänge der Kraftlinien.

60
50
40
30
20
10
0

Fi

Rühl

Herstellung der Kerne der Wechselstromapparate aller Art dient, ähnliche Kurven besitzen, wie wir solche früher (Grundzüge Taf. I, S. 80) für einige Eisensorten bereits mitgeteilt haben.

Die Erfahrung hat auch gezeigt, dass die Kurve für Eisenblech nicht völlig mit der für Schmiedeeisen gefundenen übereinstimmt.

Der Kurve für Eisenblech fügen wir des Vergleichs halber solche für Gusseisen, Schmiedeeisen und solche für Flusseisen bei. Letzteres Material, zuerst von der Firma Krupp in Essen hergestellt, wird seiner trefflichen magnetischen Eigenschaften wegen jetzt vorzugsweise unter dem Namen Dynamostahl für die Kerne von Elektromagneten, die durch Gleichstrom erregt werden, verwendet.

Da nun aber an Wechselstrom-Maschinen auch Gleichstrom-Elektromagneten vorkommen, so haben diese Kurven auch für die Wechselstromtechnik ein thatsächliches Interesse. Abweichend von den früheren Kurven ist hier in Fig. 43 (Tafel I) als Ordinate unmittelbar die für 1 *cm* Kraftlinienweg erforderliche Anzahl von Ampèrewindungen aufgetragen; als Abscisse ist, wie schon früher, die magnetische Induktion, d. h. die in einem Quadratcentimeter enthaltene Anzahl von Kraftlinien gewählt.

9. Über Wechselstrom-Elektromagneten.

Bei der Bestimmung von Elektromagneten, durch deren Windungen Wechselströme fliessen sollen, kann man nicht in der einfachen Weise verfahren, wie bei Gleichstrom-Elektromagneten. (Vergl. Grundzüge V, 6., S. 80 u. s. f.)

Der Widerstand der Wickelung eines Gleichstrommagneten nimmt proportional der Anzahl der Windungen zu; der induktive Widerstand einer um einen Eisenkern gewickelten Spule, die von einem Wechselstrome durchflossen wird, ändert sich aber proportional $2\pi \sim L$ und der Selbstinduktions-Koëffizient ist (vergl. Kap. II, 2., S. 25) proportional dem Quadrate der Windungszahl. Man giebt Wechselstrom-Elektromagneten daher meist nur wenig Windungen, die man von einem kräftigen Strome durchfliessen lässt. Um den starken Strom zu leiten, ohne gleichzeitig den Draht hoch zu erwärmen, wählt man dicken oder mehrere parallel geschaltete Drähte. Der Ohm'sche Widerstand und der Spannungsverlust infolge desselben ist daher bei Wechselstrom-Elektromagneten meist so gering, dass er ohne erheblichen Fehler vernachlässigt werden kann.

Sollen ein Wechselstrommagnet und ein Gleichstrommagnet gleiche Arbeitsleistungen hervorbringen, so muss man bedenken, dass die Arbeitsleistung eines Wechselstromes gleich $E \cdot J \cdot \cos\varphi$ und die eines Gleichstromes gleich $E \cdot J$ ist. Da nun $\cos\varphi$, der Cosinus

des Winkels der Phasenverschiebung stets kleiner als 1 ist, so folgt hieraus, dass bei gleichen Werten von E die Stromstärke eines Wechselstrommagneten im Verhältnis von $\frac{1}{\cos\varphi}$ grösser sein muss, als die Stärke des Stromes, der die Windungen des Gleichstrom-Elektromagneten durchfliesst.

Wenn ein Wechselstrom durch die Spule eines Elektromagneten fliesst, so tritt im allgemeinen zwischen dem Strom und der zugehörigen E M K infolge der Selbstinduktion eine Phasenverschiebung ein. — Statt nun, wie wir es früher gethan haben, die E M K in zwei Komponenten zu zerlegen, von denen die eine mit dem Strome in gleicher Phase ist, während die andere, die der elektromotorischen Gegenkraft der Selbstinduktion entsprechende Komponente, hierzu senkrecht ist, können wir auch den in der Leitung fliessenden Strom

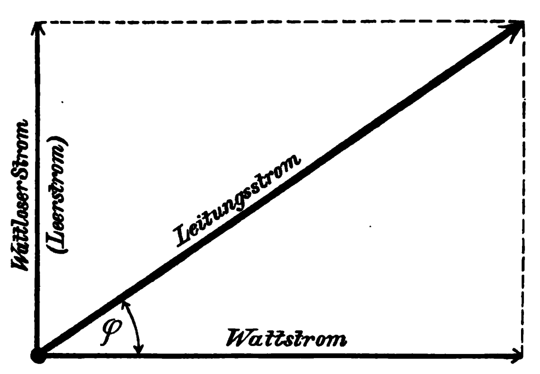


Fig. 44. Zerlegung des Stromes in zwei Komponenten.

in zwei Komponenten zerlegen, in eine Komponente von der Grösse $J \cdot \cos\varphi$, die mit der E M K in gleicher Phase ist, und eine hierzu senkrechte Komponente $J \cdot \sin\varphi$. (Vergl. Fig. 44.) Die erste ist der Nutzstrom oder Wattstrom, die andere die wattlose Stromkomponente, die keine Arbeit leistet, sondern nur zur Erregung des magnetischen Feldes dient. Da während der Magnetisierung durch einen Wechselstrom ein Teil der Stromenergie für Überwindung der Hysteresis im Eisen und zur Erzeugung von Wirbelströmen verbraucht wird, so ist die Stromkomponente, die mit der Klemmenspannung in gleicher Phase ist, nicht reiner Nutzstrom, sondern ein Teil dieses Stromes wird zur Leistung der Arbeit der Hysteresis und der Wirbelströme im Wechselstrom-Apparate selbst verbraucht und in den Eisenteilen des Apparates in Wärme verwandelt.

Nennen wir die in einer Sekunde für Hysteresis und Wirbel-

ströme verbrauchte Energiemenge (gemessen in Watt) A_h, so ist der für Leistung dieser Arbeit verbrauchte Strom i_h

$$i_h = \frac{A_h}{e_{eff}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

wenn e_{eff} die effektive Spannung ist.

Die wattlose Stromkomponente i_μ ist, wenn man mit B die magnetische Induktion im Kern des Magneten, mit λ die mittlere Länge des Kraftlinienweges, mit n die Anzahl der Windungen und mit μ die magnetische Permeabilität des Materiales versteht, gleich[1])

$$i_\mu = \frac{B \cdot \lambda}{1{,}78 \cdot n \cdot \mu} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

Verläuft der Weg der Kraftlinien nicht durchaus in Eisen gleicher

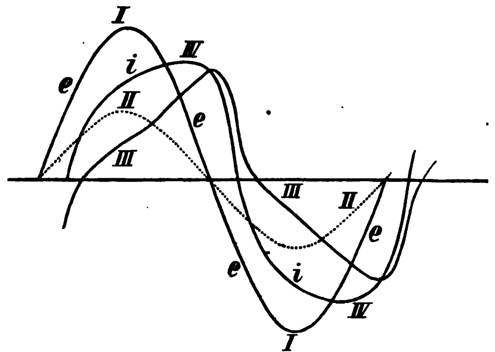


Fig. 45. Kurven der EMK (I), des Nutzstromes (II), des Magnetisierungsstromes (III) und des Gesamtstromes (IV) in den Windungen eines Wechselstrommagneten.

Art, so tritt an die Stelle von $\frac{\lambda}{\mu}$ eine Summe ähnlicher Grössen $\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} + \ldots\ldots$, wobei $\frac{\lambda_m}{\mu_m}$ das Verhältnis der Weglänge der Kraftlinien zur Permeabilität in den verschiedenen Materialien ist.

Der gesamte Magnetisierungsstrom i_o, d. h. der Strom, der die Windungen des Elektromagneten durchfliessen muss, auch wenn kein Nutzstrom vorhanden ist, wird hiernach:

$$i_o = \sqrt{i_h^2 + i_\mu^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

---

[1]) Nach der in den Grundzügen (Kap. V, 6., S. 80, Formel 10) mitgeteilten Gleichung ist:

$$B = \mu \cdot \frac{4\pi\, i\, n}{10\lambda}$$

Hieraus folgt sofort, wenn man im vorliegenden Falle zur Unterscheidung für i den Buchstaben i_μ gebraucht, die obige Formel.

Bei Transformatoren, Elektromotoren und ähnlichen Wechselstrom-Apparaten nennt man i_0 den Leerlaufstrom.

Es bedarf kaum der besonderen Erwähnung, dass es einen solchen Leerlaufstrom auch giebt, wenn statt eines Elektromagneten mit positiver Selbstinduktion in der Strombahn des Wechselstromes eine Kapazität, Kondensatoren oder Zersetzungszellen mit negativer Selbstinduktion (vergl. Kap. II, Fig. 27., S. 42) vorhanden sind.

Da, wie bekannt, im Eisen keine genaue Proportionalität zwischen magnetisierender Kraft und erzeugter Kraftlinienzahl besteht, so wird die Form der Kurve, durch die die Abhängigkeit des Stromes von der Zeit dargestellt wird, bei dem Magnetisierungsstrome nicht unerheblich von der Sinusform abweichen, auch wenn die erregende EMK ursprünglich sich nahezu nach einer Sinoide änderte.

In Fig. 45 stellt beispielsweise für einen Wechselstrom-Elektromagneten Kurve I die Kurve der EMK vor, II ist die Kurve des mit dieser in der Phase übereinstimmenden Nutzstromes, III die Kurve des Magnetisierungsstromes und endlich ist IV die Kurve des Gesamtstromes. Sowie die Form der Kurven wesentlich von der Sinuslinie abweicht, und Strom- und Spannungskurve nicht mehr in der Gestalt ähnlich sind, kann auch von einer Phasenverschiebung im ursprünglichen Sinne nicht mehr gesprochen werden, da Maxima und Minima und Durchgänge durch die Nulllage nicht mehr, wie bei einer Sinuskurve, symmetrische Lagen haben.

Streng genommen hat dann jede Ordinate des Stromes eine verschiedene Phasenverschiebung gegenüber der zugehörigen Ordinate der Spannungskurve; man kann daher nur noch von einem Mittelwerte φ der Phasenverschiebung reden.

Man nennt dann den Faktor, mit dem man $e_{eff} \cdot i_{eff}$ multiplizieren muss, um die Leistung des Wechselstromes $e_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos \varphi$ zu erhalten, den Leistungsfaktor oder Arbeitsfaktor. Bei in der Praxis vorkommenden Wechselstrommagneten kann daher von einer Phasenverzögerung φ des Stromes gegen die Spannung nur in dem Sinne gesprochen werden, dass $\cos \varphi$ der Faktor ist, mit dem man das Produkt aus effektiver Spannung und effektivem Strom multiplizieren muss, um die Arbeitsleistung des Wechselstromes zu erhalten.

4. Kapitel.

Allgemeines über Wechselstrom-Maschinen.

1. Geschichtliches.

Die ersten elektrischen Maschinen, die konstruiert worden sind, waren Wechselstrommaschinen, deren Feldmagneten durch permanente Magnete gebildet wurden; erst später sind dieselben durch Hinzufügung von Kommutatoren in Gleichstrom-Maschinen, die intermittierende Ströme lieferten, umgewandelt worden.

Da die Teilung des elektrischen Lichtes, d. h. der gleichzeitige Betrieb mehrerer Gruppen von Bogenlampen in von einander unabhängigen Stromkreisen, zuerst mit Wechselstrom gelang, so schien es sogar einige Zeit, als ob die Wechselstrom-Maschine den Vorrang in den technischen Anwendungen der Elektrizität erlangen sollte. — Nachdem aber durch die Erfindung der Nebenschluss- und gemischten Gleichstrom-Maschinen für unveränderliche Klemmenspannung und durch die Konstruktion geeigneter Bogenlampen der Betrieb parallel geschalteter Beleuchtungskörper auch durch Gleichstrom gelungen war, traten mehrere Jahre hindurch die Wechselstrom-Maschinen mehr und mehr in den Hintergrund. Einzelne Elektrotechniker glaubten in jener Zeit sogar schon diese Maschinen als gänzlich veraltet ins alte Eisen verweisen zu dürfen.

Durch die Erfindung der Transformatoren durch Gaulard und deren praktische Umgestaltung durch Déri und Blâthy, und weiterhin durch die Erfindung des magnetischen Drehfeldes durch Ferraris, Tesla und andere wurden jedoch der Wechselstromtechnik neue Bahnen erschlossen, und die Wechselstrom-Maschinen gelangten zu neuer, vorher nicht geahnter Bedeutung.

Ganz neuerdings hat die hohe technische Vollendung, zu der die Erfindung der Mehrphasenmotoren durch Galileo Ferraris und Nikolaus Tesla, durch die Konstruktionen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, der Maschinenfabrik Oerlikon, Browns, Siemens & Halske und anderer geführt worden ist, für den Grossbetrieb dem mehrphasigen Wechselstrom, besonders dem sogenannten Drehstrom, das Übergewicht gesichert.

Überall, wo elektrische Ströme von hohen Spannungen zur Verwendung kommen müssen, um mit verhältnismässig geringen Leitungsquerschnitten in grössere Entfernungen Energie übertragen zu können, bedient man sich fast ausschliesslich der Wechselströme, da die dauernde Isolierung der Kollektorsegmente von einander der Erzeugung von Gleichströmen von hoher Spannung erhebliche Schwierigkeiten und ein Element grosser Betriebsunsicherheit entgegenstellt.

Bei einer grossen Zahl neuerer Konstruktionen von Wechselstrom-Maschinen ruhen sämtliche stromführenden Leiter und werden nur noch Eisenteile bewegt. Bei solchen Maschinen giebt es dann nicht einmal mehr Schleifringe und Bürsten; alle Teile, an denen gelegentlich Funken auftreten könnten, fallen weg.

Die Zahl der Stromwechsel in der Sekunde darf nicht zu klein sein, da sonst das Licht der Bogenlampen und auch das von Glühlampen mit dünnen Kohlenfäden ein störendes Flimmern zeigen. Die gebräuchlichen Zahlen der Stromwechsel (in einer vollen Periode erfolgen zwei Richtungswechsel des Stromes) liegen zwischen 80 und 260 in einer Sekunde. In Deutschland hat man sich fast durchgängig für eine Zahl von 50 vollen Perioden in 1 Sekunde entschieden.

Es ist leicht ersichtlich, dass man eine so grosse Anzahl von Perioden nicht dadurch erreichen kann, dass man eine einzelne Spule in einem einfachen Magnetfelde rotieren lässt, wie dies seiner Zeit (Grundzüge der Elektrotechnik, Kap. XVIII, 2., S. 263) bei Besprechung der denkbar einfachsten Wechselstrommaschinen angenommen war. Man würde dann auf so hohe Winkelgeschwindigkeiten geführt werden, dass die Beanspruchung der rotierenden Teile der Maschinen durch Centrifugalkraft und die Verluste durch Reibungswiderstände aller Art zu gross werden würden. Diese Betrachtung ergiebt von selbst, dass man den Anker aus verschiedenen Spulen oder einer grösseren Zahl von Windungen zusammensetzen wird, die sich auf die ganze Oberfläche des Ankers möglichst gleichmässig verteilen, und dass man diese Spulen durch eine grössere Zahl von Magnetfeldern entgegengesetzten Vorzeichens hindurch führen wird, wie solche durch eine vielpolige Anordnung der Feldmagneten erzeugt werden können (vergl. Grundzüge S. 355).

2. Einteilung der Wechselstrommaschinen.

Die Wechselstrommaschinen können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden.

Nach der Beschaffenheit des Ankers zerfallen sie zunächst in

solche mit *Scheibenanker*, und das ist die Art, die unter den älteren Konstruktionen am häufigsten vorkommt, ferner in Maschinen mit *Ringanker*, in Maschinen mit *Trommelanker* und in Maschinen mit *Polankern*.

Auch können diese Maschinen darnach eingeteilt werden, auf welche Weise die Änderungen der die Ankerspulen durchschneidenden Kraftlinien hervorgebracht werden. Bei der einen haben die Kraftlinien einen nahezu festliegenden Weg und die Ankerspulen werden durch denselben hindurchgeführt, das sind die *Wechselstrommaschinen mit feststehenden Feldmagneten* und rotierendem Anker.

Bei anderen Maschinen steht der Anker fest und die Feldmagneten werden an demselben vorüber geführt, das sind die *Maschinen mit beweglichen Elektromagneten*.

Bei einer dritten Gruppe ist nur der Weg der Kraftlinien veränderlich und die Induktionswirkung wird durch Veränderungen der Kraftlinienzahl erzeugt, die durch die Spulen hindurchgehen; hierher gehören die sogenannten *Induktormaschinen*, bei denen alle von Strömen durchflossenen Kupferleiter feststehen können und nur ein Eisenkörper in einem Magnetfelde bewegt wird.

Ein Gesichtspunkt, der nicht zu durchschlagenden Unterscheidungen führt, ist der, ob der Anker Eisen enthält oder ob dies nicht der Fall ist. Die meisten Konstruktionen können ohne grundsätzliche Änderungen der Gesamtanordnung entweder so gebaut werden, dass der Anker mit Eisen versehen werden kann, oder so, dass der Hohlraum der Ankerspulen mit einem nichtmagnetischen Materiale ausgefüllt wird. Maschinen letzterer Art sind jetzt ziemlich selten geworden.

Einen weiteren Einteilungsgrund bildet die Art der Erregung Feldmagneten. Bei der einen Gruppe von Wechselstrommaschinen en die Feldmagneten durch Gleichstrom erregt, der von einer strommaschine herrührt, die entweder gesondert angetrieben oder deren Anker auf der rotierenden Achse der Wechselschine mit befestigt ist.

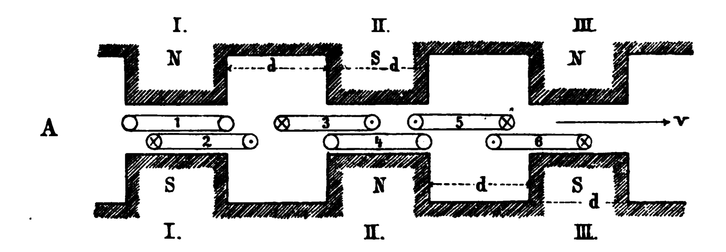
n werden Akkumulatorenbatterien zur Speisung der Feldmagneten solcher *Maschinen mit Fremderregung* verwendet.

Bei *selbsterregenden Wechselstrommaschinen* wird entweder der Strom einiger Spulen des Ankers durch einen Gleichrichter in Gleichstrom verwandelt, oder ein Teil des erzeugten Hauptstromes wird zuvor durch einen Transformator in Strom geringer Spannung umgewandelt, dann durch einen Kommutator in einen undulierenden Gleichstrom umgesetzt und hierauf um die Feldmagnete herumgeführt.

Auch nach der Art der Wechselströme, die erzeugt werden, können die Wechselstrommaschinen eingeteilt werden, je nachdem dieselben gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstrom, zweiphasigen unverketteten oder verketteten Wechselstrom, oder endlich dreiphasigen Wechselstrom liefern.

3. Einfacher Fall der Bewegung einer Spule in einem mehrpoligen Felde.

Wir stellen uns zunächst vor, wir hätten eine Anzahl abwechselnd entgegengesetzter magnetischer Felder, I, II, III, wie solche z. B.



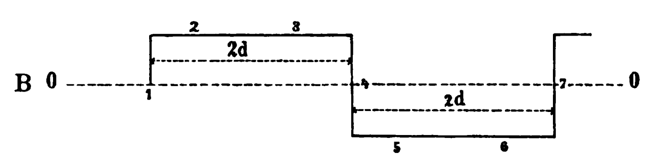


Fig. 46. Eine einzelne Spule, deren Weite gleich der Polbreite ist, bewegt sich in einem mehrpoligen Felde.

bei den Wechselstrommaschinen von Siemens und den von Ferranti vorkommen, und zwischen diesen Feldern bewege sich zunächst eine einzige Spule. Der Einfachheit wegen zeichnen wir den Durchschnitt so, als ob die Magnetfelder in einer Geraden angeordnet wären; thatsächlich liegen dieselben auf Kreisperipherien in gleichen Winkelabständen neben einander. Wir nehmen daher vorläufig auch an, die Spule glitte parallel dieser Geraden mit gleichförmiger Geschwindigkeit v hin. Die Weite der Spule sei d, wenn unter d die Breite jedes Feldes und des Zwischenraumes zwischen zwei benachbarten Feldern von entgegengesetztem Vorzeichen verstanden wird. (Vergl. Fig. 46.)

Wir betrachten die Induktionsvorgänge, die in der Spule ein-

treten, wenn sich dieselbe in den aufeinander folgenden Stellungen 1, 2, 3, 4 . . . befindet.[1])

Die in der Spule in den verschiedenen Stellungen induzierten E M Kräfte sind als Ordinaten auf der Linie 0 0 nach Grösse und Richtung in der unteren Figur B abgetragen.

Es ist klar, dass die in der mit der Geschwindigkeit v vorüber geführten Spule induzierte E M K gleich Null ist, wenn die Spule gerade ringförmig ein Magnetfeld umschliesst (Stellung 1 in Fig. 45). Die induzierte E M K bleibt nahezu unveränderlich, so lange die rechte Seite der Spule von dem rechten Rande des Kraftlinienfeldes I bis zum linken Rande des Feldes II fortschreitet (Stellung 2). Denn bei dem Fortschreiten der Spule mit gleichförmiger Geschwindigkeit v werden in gleichen Zeiten auch gleich viel Kraftlinien von der linken Quadratseite der Spule geschnitten, während sich die rechte Quadratseite in einem Raume bewegt, der keine Kraftlinien enthält. Um die Richtung der in den Spulen induzierten E M Kräfte deutlicher sichtbar zu machen, denken wir uns in den Drahtquerschnitten Pfeile gezeichnet, die die Richtung der dadurch erzeugten Ströme andeuten. F l i e s s t d e r S t r o m a u f d e n B e s c h a u e r z u, s o s i e h t m a n d i e S p i t z e d e s P f e i l e s (Z e i c h e n ⊙); f l i e s s t d e r S t r o m v o m B e s c h a u e r f o r t, s o s i e h t m a n d i e F i e d e r u n g d e s P f e i l e s (Z e i c h e n ⊗).

Unmittelbar darauf tritt dann die rechte Seite der quadratischen Spule in Wirksamkeit (Stellung 3) und durchschneidet, so lange sie im nächsten entgegengesetzt gerichteten Kraftlinienfelde II fortschreitet, in gleichen Zeiten ebenfalls wieder gleich viel Kraftlinien von entgegengesetzter Richtung. Die linke Quadratseite der Spule bewegt sich nun in dem zwischen den Magnetfeldern I und II gelegenen Raume, in dem keine Kraftlinien liegen, die linke Quadratseite erfährt somit jetzt keine Induktionswirkung. Es wird dann noch längs dieses Weges eine gleich grosse E M K induziert, so lange bis die Spule wieder das ganze Kraftlinienfeld II gerade umfasst (Stellung 4) und dabei die E M K Null wird. Da die Spule zunächst als in sich geschlossenes Quadrat gedacht wird, veranlasst die entgegengesetzt gerichtete Induktionswirkung auf die rechte Quadratseite der Spule einen Strom, der in derselben Richtung die Spule durchfliesst, wie ihn die Induktion auf die linke Quadratseite in dem entgegengesetzten Felde I hervorbrachte. Die E M K besitzt daher noch die gleiche Grösse und gleiches Vorzeichen. Sowie aber die rechte Quadrat-

[1]) Anmerkung. Um die Deutlichkeit der Figur zu erhöhen, haben wir die verschiedenen Stellungen in zwei Linien unter einander angeordnet; in Wirklichkeit bewegt sich die Spule in den Stellungen 1, 2, 3 . . . in derselben Geraden fort.

seite das Feld II verlässt und in den von Kraftlinien freien Raum eintritt, schneidet nur die linke Quadratseite Kraftlinien, die den im Felde I entgegengesetzt gerichtet sind. Es wird nunmehr, wie auch die Richtungsbezeichnung in den Drahtquerschnitten andeutet, eine der bisherigen entgegengesetzt gerichtete E M K induziert, und diese bleibt erhalten, bis die Spule das Feld III gerade umfasst. — Nunmehr ist genau derselbe relative Zustand erreicht, wie in Stellung 1; daher wiederholt sich nun der beschriebene Vorgang.

Es entsteht somit eine aus Rechtecken zusammengesetzte Wellenlinie, wie wir sie unmittelbar darunter gezeichnet haben. Die mittlere E M K ist theoretisch gleich der maximalen E M K.

Die soeben angestellte Betrachtung zeigt, dass in jedem Augenblicke von jeder Ankerwindung immer nur eine der vier Seiten des Quadrates der Induktionswirkung ausgesetzt ist, während die drei anderen nur als schädlicher Widerstand in Betracht kommen.

Daraus ergiebt sich, dass die quadratische Form und gleiche Breite der Pole und Spulen wegen der unvollkommenen Ausnutzung des Drahtes unzweckmässig ist, dass man vielmehr die Form der Spulen in der zur Bewegungsrichtung und zum Verlaufe der Kraftlinien senkrechten Richtung verlängern muss und dementsprechend den Polen der Feldmagneten und den Spulen längliche Formen statt quadratische zu geben hat, und dass man zusehen muss, ob nicht ein günstigeres Verhältnis zwischen der Breite der Spule und der Breite der Pole aufgefunden werden kann.

4. Die Spule ist breiter als das Kraftlinienfeld.

Wir wollen im übrigen zunächst bei dem zuletzt betrachteten Falle stehen bleiben, aber annehmen, die Spule sei breiter als eine Polbreite; die Spulenbreite sei l, die Polbreite sei d. Die Spule ist dann kein Quadrat mehr, sondern ein Rechteck mit der Breite l.

Es ist klar, dass dann auf die Länge l — d des Weges der Spule, während dessen sich sowohl die rechte als die linke Seite der Spule in einem nicht mit Kraftlinien erfüllten Raume bewegt (Stellung 1 in Fig. 47), keine E M K induziert wird, weil überhaupt keine Kraftlinien vom Drahte geschnitten werden.

So lange dann bei Verschiebung der Spule zwischen den Feldern nur die linke Seite der Spule allein sich im ersten Felde I bewegt, (Stellung 2) wird dieselbe E M K induziert, wie im früher betrachteten Falle, wenn Feldstärke, Geschwindigkeit und induzierte Drahtlänge gleich gross sind. Die Länge dieses Weges ist 2 d — l. Sowie aber dann die rechte Seite der Spule in das zweite Kraftlinienfeld eintritt, wird die E M K doppelt so gross, weil die in der rechts

und links gelegenen Drahtseite induzierten gleichgrossen E M Kräfte sich addieren (Stellung 3)[1]), weil sie zur Entstehung gleichgerichteter Ströme in der Spule Anlass geben. — Auf einem weiteren Wege von der Länge 2 d—l, so lange sich nur die rechte Seite der Spule allein im zweiten Felde befindet, ist die E M K von gleicher Grösse wie in Stellung 2 und von gleichem Vorzeichen wie dort (Stellung 4).

Wenn dann auf der Weglänge l—d beide Seiten der Spule in den von Kraftlinien freien Räumen sich bewegen (Stellung 5), ist die E M K Null. Nunmehr wechselt (Stellung 6) die E M K ihr Vorzeichen, wird doppelt so gross (Stellung 7), Null u. s. f. Auch weiterhin wechseln kürzere Strecken, in denen die E M K die frühere

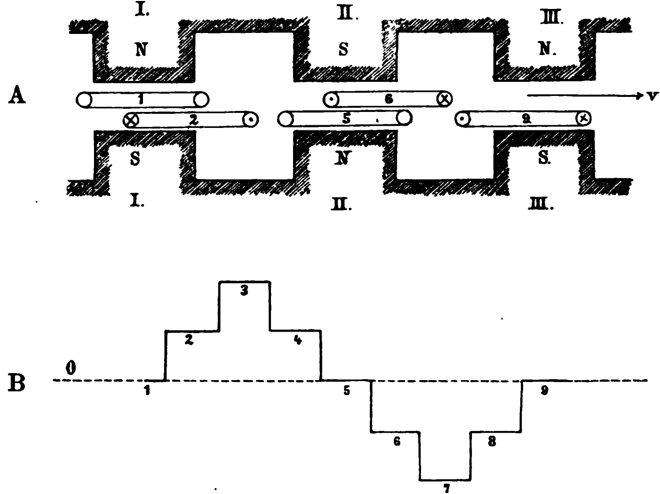


Fig. 47. Die Spulenbreite l ist grösser als die Polbreite.

Grösse erlangt, mit Strecken, auf welchen die E M K den doppelten Wert, und mit Strecken, auf denen sie den Wert Null hat. Die Linie, die den Verlauf der E M K als Funktion der Zeit darstellt, zeigt eine treppenförmige Gestalt. Die effektive E M K ist dieselbe geblieben, die maximale E M K ist auf den doppelten Wert gewachsen. Infolge der doppelt so hohen Maxima der E M K wird die Isolation doppelt so stark beansprucht als vorher.

Selbst wenn man Spule dicht an Spule legen könnte, wäre es doch nur möglich, im Verhältnis von $\frac{d}{l}$ weniger Spulen auf dem Ankerumfang anzubringen. Die gesamtelektromotorische Kraft sämtlicher

[1]) Stellung 3, 4 und 7, 8 sind nicht mit abgebildet.

hinter einander geschalteter Spulen des Ankers würde somit im gleichen Verhältnis geringer ausfallen. Die Anwendung von Spulen, die breiter sind als die Pole, würde somit, wenn die Pole um ihre eigene Breite von einander abstehen, nur Nachteile im Gefolge haben.

Wir betrachten nunmehr den Grenzfall (vergl. Fig. 48), dass sich eine Spule von der Länge $l = 2d$ zwischen Feldern von abwechselnd entgegengesetzter Richtung der Kraftlinien bewegt, zwischen denen gleichbreite Felder ohne Kraftlinien liegen. Während eines Weges von der Länge d summieren sich die Induktionswirkungen, die auf beiden Spulenseiten ausgeübt werden (Stellung 2), die EMK ist daher 2e; während eines ebenso langen Weges bewegen sich

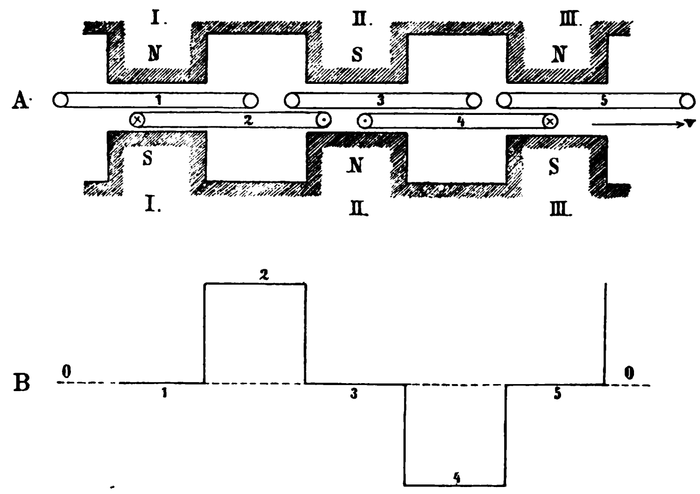


Fig. 48. Die Spule ist doppelt so breit als die Polbreite und als der Polabstand.

beide Drähte in Räumen, die keine Kraftlinien enthalten, die EMK ist somit Null (Stellung 1 und 3). Hierauf tritt die rechte Spulenseite (Stellung 4) in das dritte, die linke Spulenseite in das zweite Kraftlinienfeld ein, die EM Kräfte, die in beiden Seiten induziert werden, haben in bezug auf die in der Spule zu erzeugenden Ströme gleiche Vorzeichen, sie addieren sich; die EMK hat nunmehr längs des Weges d den Wert 2e; dann wird sie wieder auf einem ebenso langen Wege (Stellung 5) gleich Null u. s. f.

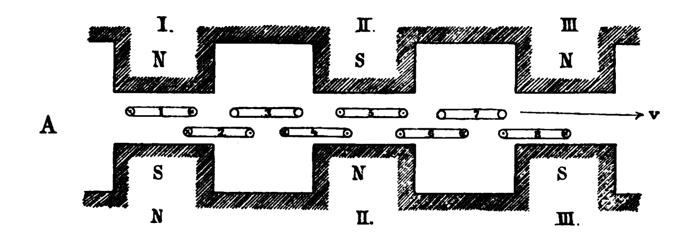
Die effektive EMK wird demnach nicht vergrössert, sondern nur anders verteilt. Wegen der Verdoppelung der Spannung muss die Isolierung der Drähte wesentlich verstärkt werden. Infolge der Verbreiterung der Spulen werden auch die an der Induktionswirkung nicht teilnehmenden Drahtstücke verlängert, und die Zahl der Spulen,

die auf einer gegebenen Länge untergebracht werden kann, wird vermindert. Die Verbreiterung der Spule bietet somit auch in diesem Falle gewisse Nachteile und keine unmittelbar wahrnehmbaren Vorteile dar.

5. Die Spulen sind weniger breit als die Pole.

Wir betrachten zunächst wieder den Fall, dass rechteckige Pole ungleichen Vorzeichens aufeinanderfolgen, zwischen denen von Kraftlinien freie Felder von gleicher Breite d gelegen sind, nehmen diesmal aber an, dass die Spulenbreite $l < d$ sei. (Vergl. Fig. 49.)

Gehen wir von der Stellung (1) aus, in der die linke Seite der



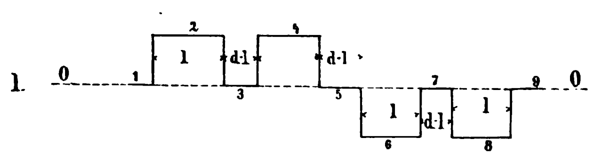


Fig. 49. Die Spulenbreite ist kleiner als die Breite der Pole und die gleichen Polabstände.

rechteckigen Spule gerade in das Kraftlinienfeld eintritt, während die vorangehende Seite sich schon innerhalb des Feldes befindet. Beide Seiten schneiden dann in gleicher Zeit gleich viel Kraftlinien, die in beiden Seiten induzierten gleichen EM Kräfte wirken aber in der Spule entgegengesetzt und heben sich innerhalb der Verbindungsstücke auf; eine Wirkung nach aussen findet nicht statt. Auf dem Wege d—l ist somit die von der Spule nach aussen abgegebene EMK gleich Null. Sowie dann (Stellung 2) die rechte Seite der Spule in den von Kraftlinien freien Raum zwischen Feld I und II ein[illegible] wird in der nachfolgenden linken Spulenseite noch im[illegible] liche EMK entwickelt, und zwar längs eines Weges[illegible] Wenn aber nunmehr (Stellung 3) auch die link[illegible] linienfeld I verlässt, bewegen sich beide in Bet[illegible]

...nen der
...ung.
Fall erörtern, was
...ten, wenn wir die

Spulenseiten längs des Weges d—l in einem kraftlinienfreien Raume und es wird keine EMK induziert, es treten also auch keine schädlichen Ströme innerhalb der Spule auf. Sowie dann (Stellung 4) die rechte Seite der Spule in das zweite gleichgerichtete Kraftlinienfeld II eintritt, wird nunmehr wiederum eine EMK von der Grösse + e auf einer Strecke l entwickelt. Der zuerst betrachtete Fall, dass in beiden Seiten der Spule gleichgerichtete, aber sich aufhebende EMKräfte induziert werden, tritt wieder ein, wenn dann auch die nachfolgende, linke Spulenseite in das zweite Kraftlinienfeld hinein geführt wird. Man erhält also in diesem Falle einen Wechselstrom, der aus je zwei gleichgerichteten Stromstössen besteht, die durch ein Stück vom Werte Null getrennt sind, dann folgen ebenso zwei entgegengerichtete Stromstösse u. s. f. (Vergl. die untere Linie B der Fig. 49.) Die effektive EMK ist erheblich niedriger als die maximale. Es ist ohne weiteres klar, dass es in diesem Falle zweckmässig wäre, die von Kraftlinien freien Felder nicht auch ebenso breit, wie die Pole zu machen, sondern dieselben nur gleich l zu machen, dann würde der mit Stellung 3 beginnende Abschnitt von der Länge l — d, in dem keine EMK entwickelt würde, in Wegfall kommen, und die effektive EMK würde dadurch relativ vergrössert werden.

6. Es folgen sich Felder von gleicher Richtung.

Nur kurz wollen wir noch den Fall erörtern, dass unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen nicht entgegengesetzt gerichtete, sondern gleiche magnetische Kraftlinienfelder sich folgen. Zunächst sollen zwischen den Magnetfeldern kraftlinienfreie Felder von gleicher Breite gelegen sein.

a) Die Spulenbreite ist gleich der Polbreite.

Die Betrachtungen, die an die Stellungen 1 und 2 des ersten derartigen Beispieles (Kap. IV, 3., S. 74) angeknüpft worden sind, bleiben dann völlig giltig. (Vergl. Fig. 50.) Sowie aber (Stellung 3) die vorauslaufende rechte Seite der Spule das zweite Kraftlinienfeld erreicht und die linke Spulenseite aus I austritt (Stellung 3 ist nicht gezeichnet), wird eine der vorigen entgegengerichtete EMK — e induziert (Stellung 4) und solange erhalten, bis auch die nachfolgende linke Spulenseite das Kraftlinienfeld II erreicht hat (Stellung 5). Verlässt nun die rechte Spulenseite das II. Kraftlinienfeld, so wird nur anders'ie linke Seite der Spule längs eines Weges l—d Kraftlinien
die Isolierung a... jetzt derselbe Fall erreicht, der in Stellung 2 dar-
Verbreiterung der
nicht teilnehmende: somit in diesem Falle dieselbe EMK, wie wenn

Felder von abwechselnd entgegengesetzter Richtung sich folgen. Die effektive EMK ist wieder gleich der maximalen, die Wechselzahl ist aber unter sonst gleichbleibenden Umständen doppelt so gross geworden, als wenn Felder von abwechselnd entgegengesetzter Polarität sich folgen.

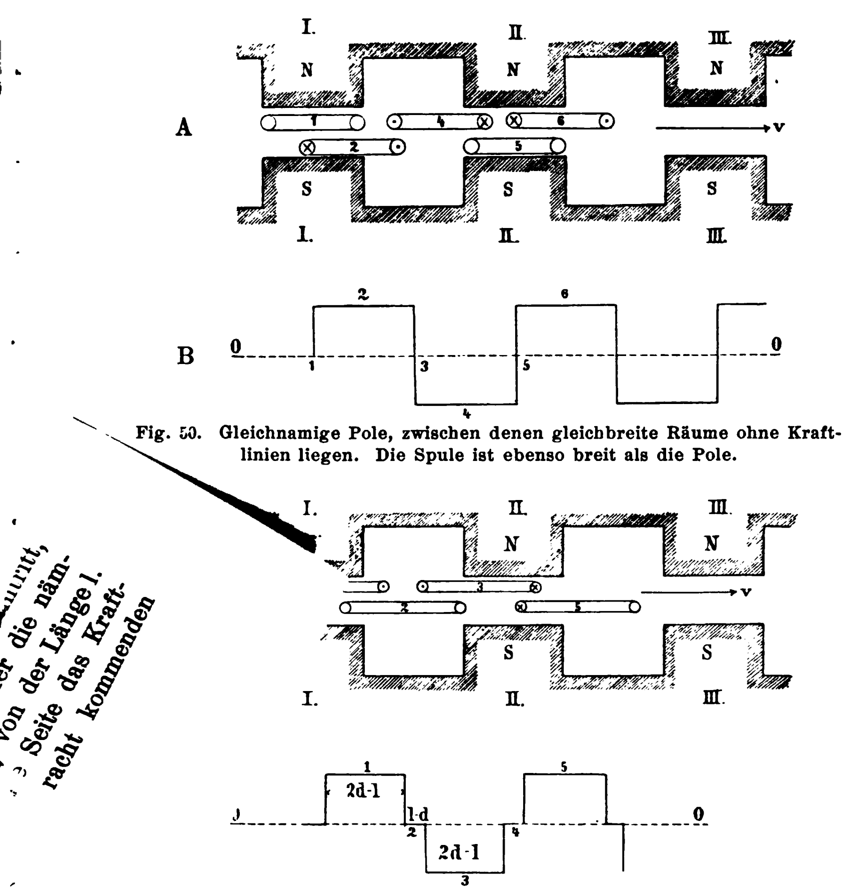


Fig. 50. Gleichnamige Pole, zwischen denen gleichbreite Räume ohne Kraftlinien liegen. Die Spule ist ebenso breit als die Pole.

Fig. 51. Zwischen gleichnamigen Polen liegen gleichbreite Zwischenräume. Die Spule ist breiter als die Pole.

Zuerst ist eine derartige Anordnung von Mordey bei einer Maschine gewählt worden; aber auch bei gewissen Maschinen der Induktionstype kommt diese Betrachtung zur Anwendung.

Nur kurz wollen wir nun auch für diesen Fall erörtern, was für Änderungen in der Verteilung der EMK eintreten, wenn wir die Spulenbreite ändern.

b) **Die Spule ist breiter als die Pole.**

Solange sowohl die rechte als die linke Seite der Spule sich in Räumen bewegen, die keine Kraftlinien enthalten, findet keine Induktionswirkung statt; die EMK ist somit Null. (Vergl. Fig. 51.) Sowie aber die linke Spulenseite das Kraftlinienfeld I erreicbt (Stellung 1) findet eine Induktion statt. Die EMK wird $+e$ und behält diesen Wert längs der Strecke $2d - l$, bis die rechte Spulenseite in das Feld II eintritt (Stellung 2). Beide Seiten der Spule empfangen nunmehr auf dem Wege $l - d$ gleiche Induktionswirkungen, die sich gegenseitig aufheben, die EMK wird wieder Null.

Wenn die linke Spulenseite aus dem Felde I austritt, befindet sich die rechte vorangehende Spulenseite im Felde II, und es wird nunmehr eine negative EMK von der Grösse $-e$ induziert (Stellung 3).

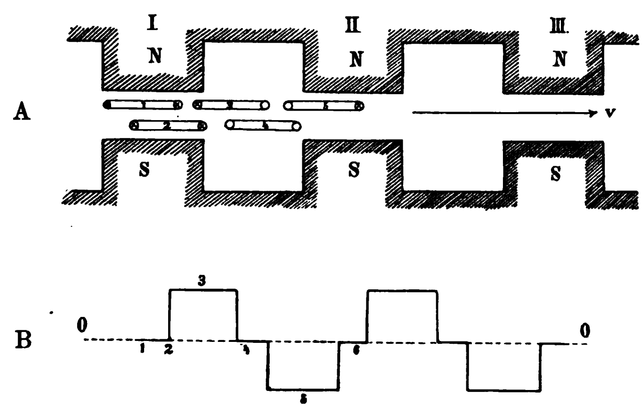


Fig. 52. Zwischen gleichnamigen Polen liegen gleichbreite Zwischenräume. Die Spule ist schmäler als die Pole.

Diese bleibt erhalten, bis die rechte Seite der Spule aus dem Felde II austritt. Nunmehr wird die EMK wieder Null. Stellung 5 entspricht dann wieder 1 u. s. f.

Auch hier ist die Wechselzahl doppelt so gross, wie in dem Falle, in dem sich unter sonst gleichen Umständen Felder von abwechselnd entgegengesetzter Richtung folgen. Die effektive EMK ist in dem Falle, dass $l > d$ ist, im Verhältnis $\frac{2d - l}{d}$ verkleinert, die rechteckigen Wellenberge und Wellenthäler sind durch stromlose Perioden getrennt. Die Isolation wird mit keiner höheren Spannung als $+e$ beansprucht.

Wenn $l = 2d$ wäre, würde überhaupt keine nützlich verwendbare EMK in den Spulen erzeugt werden.

c) Die Spule ist schmäler als die Pole.

Solange beide Spulenseiten sich im Kraftlinienfelde I befinden, ist die Induktionswirkung auf beiden Spulenseiten gleich, hebt sich auf, die EMK ist daher gleich Null (Fig. 52, Stellung 1 und 2). Erst wenn die vorausgehende rechte Spulenseite in den keine Kraftlinien enthaltenden, zwischen Feld I und II gelegenen Raum eintritt (Stellung 3), wird in der linken Spulenseite die EMK + e induziert, während die Spule den Weg l zurücklegt. Dann bewegen sich (Stellung 4) beide Spulenseiten auf einem Weg d — l, beide in dem von Kraftlinien freien Raum, die Induktionswirkung ist Null. Sowie die rechte, vorangehende Spulenseite ins Feld II eintritt, wird die EMK — e induziert. Diese bleibt auf der Wegstrecke d — l erhalten (Stellung 5) und wird wieder Null, wenn auch die nachfolgende linke Seite in das zweite Kraftlinienfeld eingetreten ist. Von da an wiederholt sich alles, wie in den Stellungen 1, 2, 3, 4, 5.

Die Wechselzahl ist auch hier doppelt so gross wie früher, die mittlere EMK ist wesentlich kleiner als die maximale.

7. Die Räume zwischen den auf einander folgenden Magnetfeldern sind schmäler als die Polbreite.

Dass die Verbreiterung der Zwischenräume, in denen sich keine Kraftlinien befinden, keine Vorteile darbieten kann, ist ohne weiteres einzusehen, dieser Fall bedarf daher keiner besonderen Untersuchung. Wiederholt sind wir aber schon bei der Betrachtung der vorhergehenden Fälle darauf gekommen, dass man zu günstigeren Verhältnissen hinsichtlich der Ausnutzung der Ankeroberfläche und der Drahtwickelung kommen kann, wenn man die Zwischenräume zwischen den Magnetfeldern verkleinert. Wir wollen daher die verschiedenen Möglichkeiten, die sich unter dieser Voraussetzung ergeben, in ähnlicher Weise wie bisher erörtern.

a) Die Ankerspule ist gleich der Polbreite.

Wenn zunächst (Fig. 53, Stellung 1) die Spule gerade das Feld umfasst, findet keine Induktion statt. Sowie aber die rechte, voranschreitende Spulenseite in den Zwischenraum des Feldes I und II eingetreten ist (Stellung 2), wird in der nachfolgenden, linken Spulenseite, die in jedem gleichen Zeitabschnitte gleichviele Kraftlinien schneidet, die EMK + e induziert. Wenn dann die voranschreitende rechte Spulenseite in das Feld II eingetreten ist (Stellung 3), wird auch da die EMK + e induziert. Da sich die linke Spulenseite noch im Feld I bewegt und doch auch diese die in gleichem Sinne wir-

kende Induktion erfährt, so steigt die EMK auf + 2e und behält diesen Wert, bis die linke Spulenseite in den von Kraftlinien freien Raum zwischen Feld I und II eintritt. Dann sinkt die EMK wieder auf + e (Stellung 4). Sobald (Stellung 5) die Spule das Kraftlinienfeld II umfasst, die Spulenmitte mit der Polmitte zusammen fällt, wird die EMK Null. Unmittelbar darauf tritt die rechte Spulenseite in den Zwischenraum ein, der das Feld II und III trennt. Die linke Spulenseite bewegt sich in Feld II (Stellung 6) und die EMK — e wird induziert.

Geht dann die rechte Spulenseite in das Feld III über und bewegt sich die nachfolgende Spulenseite noch im Feld II (Stellung 7, in der Figur nicht gezeichnet), so steigt die EMK auf — 2e.

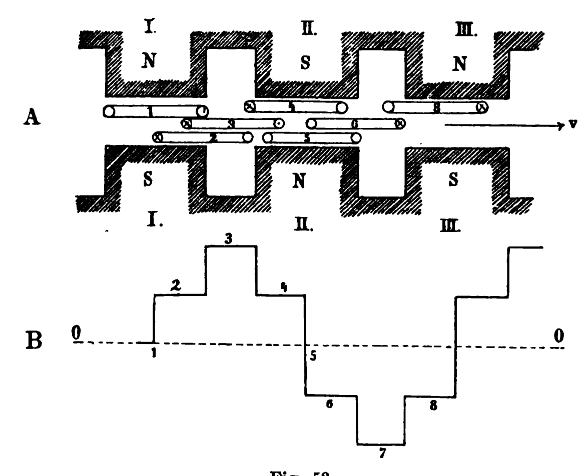


Fig. 53.
Zwischen entgegengesetzten Polen befinden sich schmälere Zwischenräume.
Die Spule ist ebenso breit als die Pole.

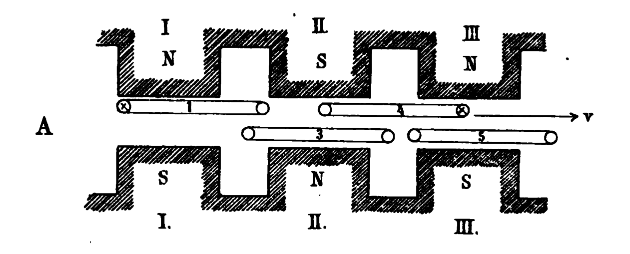
Verlässt die linke Spulenseite das Feld II, so bleibt die rechte Spulenseite noch eine Zeit lang im Felde III und die induzierte EMK sinkt auf — e.

Wenn dann die Spule das Feld III gerade umfasst, wird die EMK wieder Null, und es ist der Zustand wieder erreicht, den wir in Stellung 1 bereits erledigt haben.

Da der Weg, auf dem sich der ganze Vorgang abspielt, kürzer ist als z. B. in dem in Fig. 47, S. 77, erörterten Falle, so ist thatsächlich ein gewisser Vorteil erreicht. Auch kann leicht eingesehen werden, dass dieser Vorteil um so grösser wird, je schmäler die Räume sind, die keine Kraftlinien enthalten.

b) Die Spule ist breiter als die Pole.

Wir betrachten ferner den Fall, dass Magnetfelder von wechselnd entgegengesetzter Richtung vorliegen, dass die Ankerspule so gross ist, als die Polbreite, vermehrt um den von Kraftlinien freien Zwischenraum. Solange die Spule ein Feld vollständig umfasst und sich beide Seiten in den Zwischenräumen zwischen zwei Feldern bewegen, die keine Kraftlinien enthalten (Stellungen 1, 3 und 5), ist die induzierte EMK Null. Die Länge dieses Weges ist sichtlich l—d. Während dann längs eines Weges von der Länge d beide Spulenseiten sich in Feldern von entgegengesetzter Kraftlinienrichtung be-



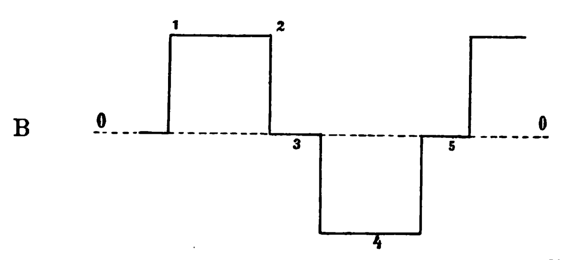


Fig. 54. Zwischen abwechselnd entgegengesetzten Polen, die durch kleinere Zwischenräume getrennt sind, bewegt sich eine Spule, deren Breite gleich der Entfernung der Polmitten ist.

wegen, hat die EMK den Betrag + 2e (Stellung 1 und 2). Wenn der rechte Draht in das dritte Kraftlinienfeld eintritt (Stellung 4), erhält die EMK das negative Vorzeichen und hat den Betrag 2e, dies findet wieder längs eines Weges d statt. Bewegt sich die Spule noch weiter nach rechts vorwärts, so schneiden dann wieder beide Seiten keine Kraftlinien, und die EMK fällt wieder auf den Wert Null. Dies geschieht wieder längs eines Weges l—d, der der Breite eines von Kraftlinien freien Feldes entspricht. Verfolgt man den Weg der Spule noch weiter, so wiederholen sich alle beschriebenen Vorgänge. Die effektive EMK ist grösser geworden, der Draht ist also

auch hier thatsächlich besser ausgenutzt. Die maximale EMK ist doppelt so gross, wie in den früher behandelten Fällen, die Isolationen müssten demnach für doppelt so hohe Spannungen bemessen werden, und das ist als ein Nachteil zu betrachten. Unter diesen Verhältnissen würden somit immer zwei Abschnitte mit entgegengesetzter EMK + 2e durch einen Abschnitt getrennt sein, in dem keine Induktionswirkung stattfindet; ganz wie dies die unten gebrochene Linie B in Fig. 54 zeigt.

c) Die Spule ist schmäler als die Polbreite.

Auch für den Fall, dass die Spule schmäler als die Polbreite, aber breiter als der Raum ist, der keine Kraftlinien enthält, soll in Fig. 55 die Untersuchung durchgeführt werden.

Um ein möglichst anschauliches Bild zu erhalten, wurden die in einer Geraden gelegenen, auf einander folgenden Stellungen der sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegenden Spule in drei unter einander liegenden Geraden zwischen den Magnetfeldern angeordnet. Die treppenstufenartig gegliederte Linie B der Fig. 55 zeigt, dass die Verkleinerung der Spulenbreite zunächst nur Nachteile gebracht hat. Die Dauer der Zeit, während der die maximale EMK + 2e bewirkt, ist verkürzt worden, dafür giebt es aber Wegstrecken der Spule, auf denen überhaupt keine nützliche Induktionswirkung stattfindet. Die effektive EMK ist demnach erheblich niedriger geworden, die Maximalwerte sind aber dieselben geblieben, die Beanspruchung der Isolation ist also nicht verringert worden.

Ein Teil dieser Nachteile wird jedoch dadurch wieder ausgeglichen, dass man eine grössere Zahl kleinerer Spulen auf der Oberfläche eines gegebenen Ankers anbringen kann; die gesamte EMK, die der Spulenzahl des Ankers proportional ist, wächst dadurch, dass eine grössere Zahl von Spulen hinter einander geschaltet werden kann.

Aus den Betrachtungen dieses Abschnitts geht hervor, dass die Verringerung der Zwischenräume im allgemeinen Vorteile mit sich bringt, dass dagegen die Wahl von Spulen, die breiter oder schmäler sind als die Magnetfelder, zwischen denen sie hindurch geführt werden, keine Vorteile, wohl aber Nachteile im Gefolge hat.

Ganz ähnlich gestalten sich auch die Ergebnisse der Betrachtungen, wenn man die von Kraftlinien freien Zwischenräume zwischen gleichen Polen verkleinert. Wir verzichten jedoch darauf, auch diese Betrachtungen durchzuführen.

Die Beschränkung der Zwischenräume, die von Kraftlinien leer sind, hat aber natürliche Grenzen. Liegen die magnetisierenden Windungen um die Pole herum, so muss für diese Erregerspulen

der nötige Platz bleiben. Verwendet man übergreifende Polschuhe, so dürfen auch die Eisenteile abwechselnd entgegengesetzter Pole nicht zu sehr einander genähert werden, weil sich sonst die Kraftlinien in grosser Zahl zwischen diesen Polschuhen schliessen, ohne die Ankerdrähte zu schneiden. Maschinen mit starker Streuung erfordern aber einen verhältnismässig grösseren Aufwand für die Magnetisierung und bieten auch sonst mancherlei Nachteile dar.

8. Schlussfolgerungen aus den Betrachtungen über die Abmessungen der Pole, Zwischenräume und Spulen.

Aus den vorhergehenden Untersuchungen ergiebt sich etwa folgendes:

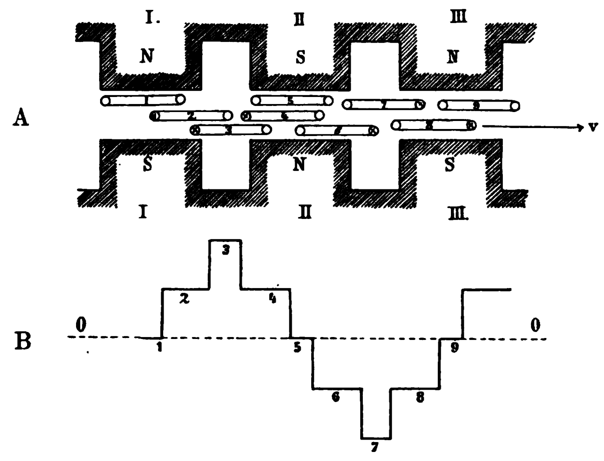


Fig. 55. Zwischen abwechselnd entgegengesetzten Polen, die durch kleinere Zwischenräume getrennt sind, bewegt sich eine Spule, die schmäler als die Polbreite ist.

1. Es ist ratsam, den Ankerspulen in der Richtung der Drehachse grössere Längen zu geben, als in der kürzeren senkrechten Richtung, damit die der Induktionswirkung ausgesetzte Drahtlänge im Verhältnis zu der nur zur Verbindung dienenden und lediglich als Widerstand wirkenden Drahtlänge vergrössert wird.

2. In den weitaus meisten Fällen erscheint es am zweckmässigsten, die Spulenbreite gleich der Polbreite zu wählen. Bei abwechselnd entgegengesetzten Magnetfeldern kann unter Umständen eine vorteilhafte Ausnutzung des Drahtes der Bewickelung dadurch erreicht werden, dass man die Spulenbreite gleich der Summe der Breite des Poles und der Zwischenräume macht.

3. Die Zwischenräume zwischen den Magnetfeldern wird man

so schmal wählen, als dies aus Rücksicht auf niedrig bleibende Werte der Streuung und wegen des für das Unterbringen der Erregerwickelung erforderlichen Raumes möglich ist.

Bei den neueren Wechselstrommaschinen findet man zumeist auch diese Bedingungen eingehalten.

Wohl zu beachten aber ist, dass die in den vorhergehenden Kapiteln angestellten Betrachtungen niemals streng zur Anwendung kommen können.

Wie wir schon bei den Gleichstrommaschinen früher erwähnten, sind die Kraftlinien nicht auf den Raum der Polfläche beschränkt und innerhalb derselben nicht gleichförmig verteilt, wie wir dies hier zunächst stillschweigend angenommen haben. (Grundzüge, Kap. XIX, 7., S. 300 u. s. f.) Da gleich gerichtete Kraftlinien sich abstossen, so treten dieselben zum Teil in die Zwischenräume zwischen den Magnetfeldern über, die Dichte der Kraftlinien ändert sich daher nirgends plötzlich, sondern allmählich und stetig.

In den Kurven der EMK, die wir vordem vom rein theoretischen Standpunkte aus konstruiert haben, finden dabei in Wirklichkeit nirgends schroffe Abfälle in vertikalen Linien statt, und die Linien haben keine Ecken. Aus den horizontalen und vertikalen Linien, die mehr oder weniger richtige Abstufungen zeigen, werden daher in Wirklichkeit krumme Linien, die ganz allmähliche Übergänge besitzen. Ausserdem müssen wir der Vollständigkeit wegen noch hinzufügen, dass die hier behandelten Fälle noch durchaus nicht alle Möglichkeiten erschöpfen, die bei ausgeführten Wechselstrommaschinen vorkommen.

Zunächst kann leicht eingesehen werden, dass es, streng genommen, nicht zweier Kränze sich gegenüberstehender Feldmagnete bedarf, sondern dass der eine derselben durch ein zusammenhängendes Stück weichen Eisens ersetzt werden kann. Durch magnetische Influenz ruft dann jeder Nordpol in dem gegenüberliegenden Eisenstück einen Südpol und jeder Südpol einen gegenüber liegenden Nordpol hervor.

Soll in diesem Falle die Zahl der Kraftlinien für jedes Feld dieselbe bleiben, so muss dieselbe Zahl von Ampèrewindungen, die vorher auf den beiden gegenüberliegenden Elektromagneten verteilt war, auf dem einen vereint werden.

Es giebt aber auch Wechselstrommaschinen, bei denen nicht entgegengesetzte, sondern gleichnamige Magnetpole sich zu beiden Seiten eines scheibenförmigen Ankers gegenüber stehen. In diese Gruppe gehören alle Wechselstrommaschinen mit einem Ringanker, ähnlich dem Grammeringe in der flachen Form, wie sie Schuckert bei seinen älteren Dynamomaschinen, der sogenannten Flachringmaschine, ver-

wendete. Die aus dem einen sich gegenüber stehenden Polpaare austretenden Kraftlinien schliessen sich dann durch das Ankereisen nach dem benachbarten Polpaare von entgegengesetzter Polarität und kehren von da zu den ersten Polpaaren zurück. (Vergl. Fig. 56.) Ein Beispiel dieser Art zeigt z. B. die Wechselstrommaschine von Kapp, die wir in Kapitel V abgebildet haben.

9. Einleitung in die Theorie der Wechselstrommaschinen.

Bleiben wir zunächst bei dem einfachsten, zuerst (Kap. IV, S. 75) behandelten Falle stehen, dass alle drei Grössen: die Breite der Pole, die Zwischenräume ohne Kraftlinien und die Breite der Spulen gleich sei und den Wert d haben. Besteht das Feld aus p Polpaaren, die auf der Peripherie eines Kreises angeordnet sind, so hat der Umfang des Kreises vom Durchmesser D, auf dem die Pole liegen, die Grösse 4 p d;

$$D\pi = 4\,p\,d \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

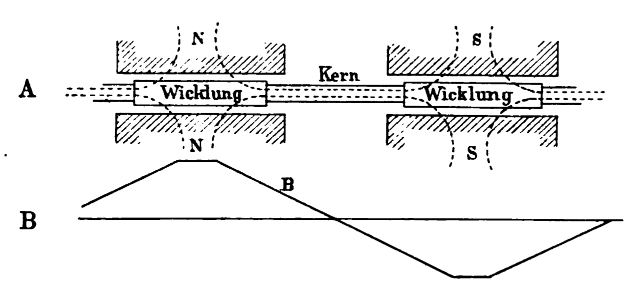


Fig. 56. Verlauf der Kraftlinien und der induzierten EMK bei einer Kapp'schen Wechselstrommaschine mit Ringanker.

Verschieben sich Anker und Feld derart relativ gegen einander, dass eine Spule in 1 Minute u mal an einem bestimmten Pole vorübergleitet, so ist die relative Geschwindigkeit (Weg in 1 Sekunde) v, mit der die der Induktionswirkung ausgesetzten Seiten der Spulen durch die Kraftlinienfelder und deren Zwischenräume hindurch gehen:

$$v = \frac{u}{60} \cdot 4\,p\,d \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Ferner ist demnach

$$D\pi = \frac{v \,.\, 60}{u} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Nach den Grundgesetzen über Induktion (vergl. Grundzüge der Elektrotechnik, Kap. VIII, 2., S. 107) ist die im vorliegenden Falle in einer Spule induzierte EMK e,

$$e = d \,.\, B \,.\, v \text{ (absolute Einheiten)} = d \,.\, B \,.\, v \,.\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Da die Spulen quadratischen Querschnitt haben und im vorliegenden Falle nur immer eine Quadratseite Kraftlinien schneidet, so ist d die Drahtlänge, auf die in jedem Augenblicke die Induktionswirkung ausgeübt wird. Mit B bezeichnen wir die Anzahl der Kraftlinien, die aus jedem Quadratcentimeter der Fläche eines Poles jedes Feldmagneten aus- oder eintreten. Durch Einführung des Wertes von v aus Gleichung 1 nimmt der Ausdruck für die maximale EMK, die in der aus einer Windung bestehenden Spule induziert wird, die Form an:

$$e = \frac{d \,.\, B \,.\, u \,.\, 4 p d}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Besteht der Anker aus 2 p hinter einander geschalteten Spulen (was jedoch praktisch nicht ausführbar ist, weil alsdann für die Drahtdicke und für die Isolation kein Raum bleiben würde), so ist die im Anker induzierte maximale EMK E, da sich die Induktionswirkung sämtlicher Spulen einfach addiert:

$$E = \frac{8 p^2 \,.\, d^2 \,.\, B \,.\, u}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Denken wir uns nun, dass jede Spule aus n in der Richtung der Kraftlinien über einander liegenden Windungen besteht, so erhält man:

$$E = \frac{8 \,.\, p^2 \,.\, d^2 \,.\, n \,.\, B \,.\, u}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Da die Spulen und die Endflächen der Pole zunächst als Quadrate von der Seite d gedacht sind, so ist

$$d^2 B = \Phi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

die Zahl der Kraftlinien, die jedes einzelne Feld enthält. Allerdings ist hierbei vorausgesetzt, dass keine seitliche Streuung stattfindet und das Kraftlinienfeld genau mit der Begrenzung der Polfläche abschneidet.

Beachtet man ferner, dass wenn im vorliegenden Falle

$$4 p n = m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

gesetzt wird, m die Zahl der wirksamen Drähte ist, so kommt man für die maximale induzierte EMK auf die Formel:

$$E = \frac{2 p \,.\, m \,.\, u \,.\, \Phi \,.\, 10^{-8}}{60} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Während eine Spule ihren Weg durch ein Feld, den nächsten Zwischenraum, das benachbarte entgegengesetzte Feld und den folgenden Zwischenraum zurücklegt, durchläuft die EMK eine volle

Periode. Die Zahl der vollen Perioden in einer Sekunde, die Grösse, die wir mit dem Zeichen $\sim$ ausdrücken, ist alsdann:

$$\sim = \frac{p\,u}{60} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

Führt man dies ein, so erhält man:

$$E = 2 \,.\, m \,.\, \Phi \,.\, 10^{-8} \,.\, \sim \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Will man vermeiden, dass zwei Drähte mit der vollen Spannungsdifferenz unmittelbar neben einander zu liegen kommen, die Isolation an dieser Stelle also mit dem vollen Unterschiede der Spannung beansprucht wird, so schaltet man nur die Spulen je einer Ankerhälfte hinter einander und die beiden Ankerhälften parallel; dann nimmt die Formel 11 die Gestalt an:

$$E = \frac{p \,.\, m \,.\, u \,.\, \Phi \,.\, 10^{-8}}{60} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12).$$

10. Vergleich der Wechselstrommaschinen und Gleichstrommaschinen.

Es liegt nahe, die so eben gefundene Formel für die EMK einer einfachen Wechselstrommaschine:

$$E = \frac{p \cdot \Phi \cdot m \cdot u \cdot 10^{-8}}{60} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

mit dem seiner Zeit für die EMK einer mehrpoligen Gleichstrommaschine abgeleiteten Ausdrucke (Grundzüge Kap. XIX, 1., S. 290) zu vergleichen. In denselben Bezeichnungen, die wir hier verwendet haben, lautet dieser Ausdruck für eine Gleichstrommaschine, deren Ankerwindungen sämtlich hinter einander geschaltet sind, genau ebenso.

Eine Wechselstrommaschine und eine Gleichstrommaschine liefern somit, sofern die Umdrehungszahl, Zahl der Polpaare und Feldstärke der Magnetfelder die nämliche ist, EM Kräfte, die sich wie 2 : 1 verhalten.

Bei dem Anker einer Gleichstrommaschine sind aber immer zwei Hälften der Windungen parallel geschaltet. Beanspruchen wir also die Ankerdrähte für jeden Quadratmillimeter Drahtquerschnitt mit einer gleichen Anzahl von Ampère, so kann der Anker der Gleichstrommaschine unter sonst gleichen Verhältnissen die doppelte Stromstärke liefern, ohne eine grössere Energiemenge in Stromwärme umzusetzen.

Wir dürfen bei diesem Vergleiche jedoch nicht vergessen, dass wir unserer Betrachtung eine Wechselstrommaschine zu Grunde ge-

legt haben, wie sie in Wirklichkeit nicht vorkommen kann. Wir haben nämlich angenommen, dass jede der 2 p Ankerspulen aus einer einzigen Lage von n gleich grossen Windungen bestehe, und dass jede Windung dieselbe Gestalt habe, wie die Endflächen der Magnetpole. Diese Voraussetzung wird bei den meisten derartigen Maschinen jedoch nicht erfüllt; die Ausnutzung der Länge des Ankerdrahtes ist ferner in diesem Falle eine ungünstige, da stets nur eine Quadratseite der Spule zur Wirkung kommt, während auf die anderen drei Quadratseiten keine Induktionswirkung ausgeübt wird und diese nur zur Erhöhung des inneren Widerstandes des Ankers beitragen. Der Gebrauch der für Gleichstrommaschinen so zweckmässigen Wellenwickelung, bei der eine wesentlich günstigere Ausnutzung des Ankerdrahtes erzielt werden kann, ist für Wechselstrommaschinen, die zur Erzeugung höherer Spannungen dienen, weniger leicht verwendbar, weil dann Drähte, die sehr verschiedene Spannungen führen, in unmittelbare Nachbarschaft gebracht werden müssen, und Beschädigungen nur durch vollständiges Abwickeln des Ankers bis zur verletzten Stelle ausgebessert werden können. Gerade bei Wechselstrommaschinen ist besonderer Wert darauf zu legen, dass Ausbesserungen leicht ausgeführt werden können, und deshalb zieht man die Bewickelung des Ankers mit einzelnen Spulen vor. Ferner werden dann leicht in hinter einander geschalteten Wickelungselementen EM Kräfte von verschiedener Phase erzeugt.

Selbstverständlich ist auch die Form der Spulen und Pole nicht ohne praktische Bedeutung, teils hinsichtlich der Ausnutzung des Drahtes, teils hinsichtlich der Form der Kurve, durch welche die EMK dargestellt wird. — Die beste Annäherung der Linie, durch die die EMK als Funktion der Zeit dargestellt wird, an die Sinuslinie scheint sich zu ergeben, wenn man sowohl den Polen als den Spulen nahezu Kreisform giebt. Untersuchungen, die Joubert an älteren Wechselstrommaschinen von Siemens & Halske, die kein Eisen im Anker enthielten, angestellt hat, zeigten, dass bei Belastung solcher Maschinen mit induktionsfreien Widerständen die Kurve der EMK fast genau eine Sinoide war. Stärkere Abweichungen von der Sinoide, zumal steilere Abfälle der Kurven, ergeben sich stets, wenn Eisen im Anker enthalten ist, oder wenn die Ströme der Maschine in Vorrichtungen verbraucht werden, die grosse Selbstinduktion besitzen, wenn also die Maschine auf Elektromotoren und Transformatoren oder Bogenlampen mit vorgeschalteten Drosselspulen arbeitet. Auch in diesen Fällen aber kann man durch Wahl geeigneter Spulenformen und passende Verteilung der Wickelung eine grosse Annäherung an die Sinoide erzielen.

11. Einfluss der Breite der Pole, Zwischenräume, Spulen und der Dicke der Spulen bei wirklich ausgeführten Maschinen.

Für eine Anzahl von Fällen hat Kapp[1]) angegeben, in welcher Weise die Breite der Pole und Spulen und die Breite der Zwischenräume zwischen den Polen unter sonst gleichen Umständen den Betrag der effektiven EMK beeinflusst. Er geht aus von der Formel 12 (vergl. Kap. IV, Abschn. 9, S. 91) für die EMK der Maschine

$$E = k \cdot \frac{p \cdot \Phi \cdot m \cdot u}{60} \cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

in der p die Polzahl, Φ die Anzahl der Kraftlinien eines Poles, m die Anzahl der wirksamen Ankerdrähte, u die Anzahl der Umdrehungen des Ankers in einer Minute bezeichnet. In dieser Formel bedeutet k einen Zahlenfaktor, der angiebt, wie viel mal die EMK der Wechselstrommaschine grösser ist, als die einer Gleichstrommaschine mit gleichem Felde, wenn in beiden Maschinen alle Ankerwindungen hinter einander geschaltet werden.

Um den Wert des Faktors k in Formel 16 zu ermitteln, hat G. Kapp eine grössere Zahl von Fällen, zumal solche, die in der Praxis häufiger vorkommen, eingehend theoretisch und durch messende Versuche an ausgeführten Maschinen untersucht.

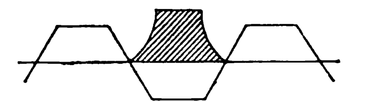


Fig 57. Verlauf der EMK, wenn Spulenbreite und Polbreite gleich und der unbewickelte innere Kern halb so breit ist.

Wenn man z. B. die Breite der Spule l gleich der Polbreite, die Breite des inneren unbewickelten Kernes der Spule gleich der halben Polbreite macht, so entsteht eine aus oberhalb und unterhalb der Nulllinie gelegenen Trapezen zusammengesetzte Kurve der EMK. (Vergl. Fig. 57.) Die über dem mittleren Trapez gezeichnete schraffierte Figur zeigt in beliebigem Massstabe den Verlauf der Grösse e^2, der Quadrate der Momentanwerte der EMK. Die Höhe eines flächengleichen Rechteckes würde die Grösse e^2_{eff}, das Quadrat der mittleren effektiven Spannung darstellen.

Wenn zwischen gleichsinnigen Polen gleich breite Zwischenräume ohne Kraftlinien liegen, Spule dicht an Spule liegt und alle Spulen hinter einander geschaltet sind, so ist die effektive EMK ungefähr 1,64 von der einer Gleichstrommaschine, welche ebensoviele Pole besitzt, als hier Pole vorhanden sind, vorausgesetzt, dass die übrigen Abmessungen der Maschinen sowie die Feldstärke der Feldmagnete und die Zahl der wirksamen Ankerdrähte gleich ist.

---

[1]) Kapp, Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom und Transformatoren, Berlin-München, Springer und Oldenbourg 1894, S. 255.

Wenn man Pole entgegengesetzten Vorzeichens auf derselben Seite des Ankers mit einander abwechseln lässt, zwischen denen gleichbreite Räume ohne Kraftlinien gelegen sind, so ist es zweckmässig, die Spulenbreite gleich der doppelten Polbreite, und die Dicke der Spulen gleich der halben Polbreite zu wählen.[1]) Unter solchen Umständen entsteht theoretisch eine durch schräge Linien gebildete, aus Dreiecken zusammengesetzte Kurve der EMK, und der effektive Wert der letzteren ist, wenn Spule dicht an Spule gereiht wird, so wie dies Fig. 58 zeigt, 2,31 mal so gross als bei einer Gleichstrommaschine mit gleicher Polzahl, gleicher Zahl der wirksamen Ankerdrähte und gleicher Feldstärke.

Die spitzen Formen für die Kurven sind weniger zweckmässig, weil die vorübergehende, wesentliche Erhöhung der EMK entsprechend höhere Ansprüche an die Isolation der Drähte stellt, die mittlere EMK jedoch durch solche hervorragende Spitzen nur wenig ver-

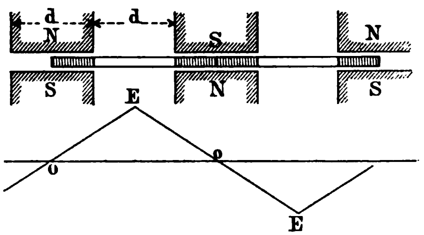


Fig. 58. Verlauf der Induktion, wenn die Dicke der Spule $\frac{1}{2}$ d und die Breite der Spule 2d ist.

grössert wird. Um Kurven mit flachen Gipfeln und Thälern zu erzielen, macht man die Spulen etwas grösser oder schmäler.

Bei dem Bau von Wechselstrommaschinen muss man immer Spulen von einer bestimmten endlichen Dicke verwenden, man kann daher die in den vorhergehenden Abschnitten 3 bis 9 entwickelten theoretischen Betrachtungen nur auf jede einzelne Windung anwenden und muss in Betracht ziehen, dass die in den einzelnen nicht genau gleich grossen Windungen der Spule induzierten EMKräfte sich addieren, wenn sie gleichgerichtet sind, dagegen subtrahiert werden müssen, wenn sie entgegengesetzte Richtung aber gleiche Phase haben, und dass die resultierenden Spannungen nach Vektordiagrammen ermittelt werden müssen, wenn die Phasen verschieden sind. Es entstehen auf diese Weise verschiedenartige Kurven, die den Verlauf der EMK in verschiedenen Stellungen der Spule zu den

---

[1]) Die älteren Maschinen von Siemens und von Ferranti besitzen ähnliche Anordnungen.

Polen darstellen, und die Form dieser Kurven kann näherungsweise theoretisch aus der Polbreite, Spulenbreite und Spulendicke im voraus durch Rechnung ermittelt werden. Diese Rechnungen haben aber nur den Wert einer ziemlich rohen Annäherung, da die Grösse der seitlichen Streuung der Kraftlinien je nach der Stromstärke und nach dem Betrage der Ankerreaktion verschieden ausfällt und bei dem Ansatze dieser Rechnungen nicht genau in Betracht gezogen werden kann.

Es giebt jedoch auch noch andere Arten der Anordnung der Ankerwickelung, die für die Herstellung von Wechselstrommaschinen geeignet sind und praktische Anwendung finden; für diese aber muss eine andere Art der Betrachtung eintreten.

Denken wir uns z. B. wieder eine Anzahl abwechselnder Pole, an denen ein eiserner Kern vorüber geführt wird oder sich wenigstens in relativer Bewegung zu diesen Polen befindet. Alsdann schliessen sich die Kraftlinien durch diesen Eisenkern von einem Pole zum nächsten, und man kann diesen Kern mit Spulen von verschiedener Breite umwickeln. Man kann die Verteilung der Kraftlinien in der Spule besser symmetrisch gestalten und grössere Feldstärken erzielen, wenn man auf beiden Seiten des Kernes gleiche Pole sich gegenüber stehen lässt. Es ist ohne weiteres klar, dass diese Wechselstrommaschinen den vielpoligen Gleichstrommaschinen mit Ringanker ähneln. Die stärkste EMK wird in diesem Falle dann induziert werden, wenn die Mitte der Spule mit der Mitte eines Poles zusammenfällt, weil in dieser Gegend die meisten Kraftlinien aus den Polen in den Eisenkern eintreten und von den vorüber gehenden Windungen der Spule so geschnitten werden, dass die EMKräfte sich summieren. Wenn die Spule weiter fortschreitet, vermindert sich die Zahl der geschnittenen Kraftlinien, und wenn die Spulenmitte mit der Mitte des zwischen zwei aufeinander folgenden Polen gelegenen, von Kraftlinien freien Raumes zusammenfällt, ist die von der Spule entwickelte EMK Null. Befindet sich ein Teil der Windungen in dem Bereiche des einen, ein anderer Teil der Windungen derselben Spule im Bereiche des nächsten Poles, so werden entgegengesetzt gerichtete EMK induziert, die sich für die Wirkung

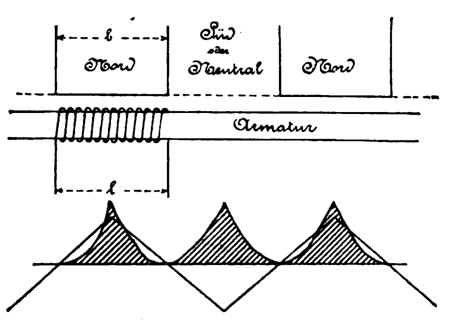


Fig. 59. Verlauf der Induktion in einer Wechselstrommaschine mit Ringanker.

nach aussen subtrahieren, beziehentlich durch innere Ströme in der Spule ausgleichen.

Theoretisch wird in diesem Falle die EMK in den verschiedenen relativen Lagen zu den Polen durch eine aus schrägen Linien zusammengesetzte eckige Figur (vergl. Fig. 59 [1]) dargestellt. Die Quadrate der EMKräfte in den einzelnen Momenten einer Halbperiode sind in dem schraffierten Stücke aufgetragen. Die Quadratwurzel aus dem Inhalte der schraffierten Fläche ergiebt die effektive EMK.

Wenn wir die Feldstärke der vorigen Anordnung beibehalten, Windungszahl und alle sonstigen Verhältnisse ungeändert lassen, aber die Polbreite nur halb so gross wählen, wie vorher, so ist nur die halbe Polbreite von der Spule bedeckt und die höchste EMK bleibt eine volle Viertelperiode hindurch ungeändert. Es entsteht dann eine Linie, durch welche der Verlauf der EMK dargestellt wird, die aus an einander stossenden Trapezen besteht (vergl. Fig. 60). Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass in diesem Falle die effektive EMK (die Quadratwurzel aus dem Inhalte der schraffierten Fläche) grösser ist als vorher.

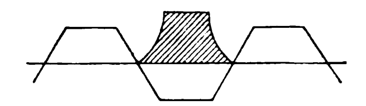


Fig. 60. Verlauf der Induktion in einem Ringanker, wenn die Spule halb so breit ist als die Pole.

Wenn man ferner der Spule die ursprüngliche Grösse giebt und die Polbreite nur halb so gross, die Zwischenräume noch kleiner macht, während die Kraftlinienzahl die nämliche bleibt, wie vorher, so wird die EMK als Funktion der Stellung wiederum durch eine aus einzelnen Trapezen zusammengesetzte Kurve dargestellt. (Vergl. Fig. 61.)

Wenn man in diesem Falle, ohne die Windungszahl zu ändern, die Spule verkürzt, so kommt man theoretisch für die Kurve der EMK wieder auf eine aus schrägen Linien zusammen gesetzte Linie mit Spitzen zurück, deren Spitzen aber höher beziehentlich tiefer liegen, als vorher die zur Nulllinie parallelen Seiten der Trapeze, weil in der günstigsten Lage mehr Kraftlinien gleichzeitig von Windungen durchschnitten werden. (Vergl. Fig. 62.) Den Verlauf der Quadrate der Momentanwerte der EMK stellt die Begrenzung der schraffierten Kurve dar.

In Wirklichkeit zeigen, wegen der seitlichen Ausbreitung der Kraftlinienfelder, wegen der Selbstinduktion der Spulen und der Rückwirkung der Spulen auf das Magnetfeld, die Kurven nirgends

---

[1]) Diese auf die Kapp'sche Wechselstrommaschine bezüglichen Abbildungen sind entnommen aus G. Kapp, Elektrische Wechselströme, deutsch von H. Kaufmann. Leiner, Leipzig.

scharfe Spitzen und schroffe Änderungen, sondern die Übergänge sind überall allmähliche, so dass Linien entstehen, die mehr oder weniger wirklichen Wellenlinien ähneln, wie wir das auch in der Fig. 62 durch die eingezeichnete gestrichelte Linie angedeutet finden.

Schreibt man die Formel für die in jeder Phase einer Wechselstrommaschine induzierte EMK:

$$E = k \cdot \sim \cdot \Phi \cdot Z \cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

so ist der Wert von k, wenn der Anker glatt ist:

Spulenbreite:	Polbreite:			
	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
0	2,00	2,46	2,83	3,46
$\frac{1}{3}$	1,76	2,31	2,50	—
$\frac{1}{2}$	1,64	2,13	2,32	—
$\frac{2}{3}$	1,49	1,94	2,12	—
1	1,16	1,49	1,64	—

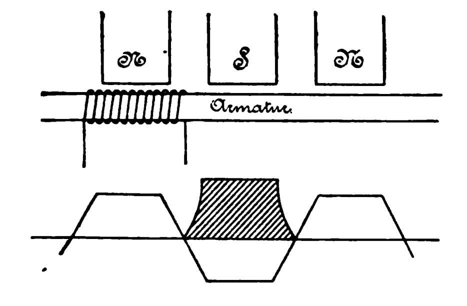


Fig. 61.
Verlauf der Induktion, wenn nur die Polbreite und die Zwischenräume, nicht aber die Spule verkleinert werden.

Fig. 62. Verlauf der Induktion, wenn im Falle der Fig. 61 auch die Spulenbreite verkleinert wird.

Die Masse der Spulen- und Polbreite beziehen sich auf den Abstand zweier benachbarter Polmitten.

Für Einphasenmaschinen mit kleinen Zahnlücken ist k = 2,22.

Für Induktionsmaschinen und Maschinen der Mordeytype ist $k = 1,9$ und $\Phi = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{2}$ gleich der halben Differenz der Anzahl Kraftlinien, die übergehen, wenn eine Polfläche und wenn eine Lücke vor der Spule steht.

12. Die Selbstinduktion und die Ankerrückwirkung.

Da der Anker jeder Wechselstrommaschine Spulen, zum Teil sogar solche Spulen enthält, in deren Innern sich Eisenkerne befinden, so

muss jede Wechselstrommaschine Selbstinduktion besitzen. Schon aus diesem Grunde, ganz abgesehen davon, dass in den meisten Wechselstromkreisen durch eingeschaltete Transformatoren, Elektromotoren, Bogenlampen und deren Drosselspulen erhebliche Beträge von Selbstinduktion vorhanden sind, muss eine erhebliche Verzögerung der Phase der Wellenlinie des Stromes gegen die Wellenlinie der EMK eintreten.

Denken wir uns nun, eine Ankerspule s bewege sich vor den Feldmagneten I und II vorüber (vergl. Fig. 63), so empfängt sie bekanntlich in der Stellung *a* die stärkste Induktion, die in ihr induzierte EMK erreicht in dieser Stellung den höchsten Wert. Wenn dagegen die Mitte der Spule mit der Mitte des Poles zusammen fällt, die Spule also dem Pole am nächsten ist, wird die induzierte EMK Null.

Wäre keine Selbstinduktion im Stromkreise vorhanden, so würden die EMK und der dadurch im Anker erzeugte Strom gleiche Phase haben, dann würde auch der Strom gleichzeitig mit der EMK in der Stellung *a* sein Maximum haben und gleich Null sein, wenn die Spule s sich gerade vor einer Polmitte befände. Wäre keine Selbstinduktion im gesamten Stromkreise vorhanden, so würde das Magnetfeld nicht merklich durch den Ankerstrom geändert werden.

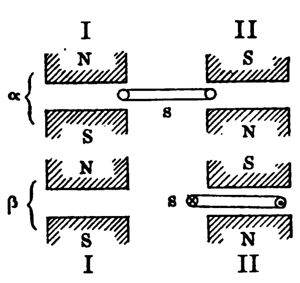


Fig. 63. Veranschaulichung der Rückwirkung des Ankers auf das Magnetfeld.

Wenn aber infolge der Selbstinduktion der Strom sein Maximum erst später erreicht, so wird z. B. die Spule schon etwa in die Stellung β gekommen sein, wenn erst der Strom infolge der Phasendifferenz seinen höchsten Wert annimmt. In dieser Lage β aber sind die in der Spule durch den Strom erzeugten Kraftlinien denen des Feldes II entgegengesetzt, sie werden also einen Teil der Kraftlinien dieses Feldes vernichten, das Feld in seiner Gesamtheit schwächen; andererseits wird eine ungleiche Verteilung der Kraftlinien innerhalb des Feldes veranlasst werden. In dem hier gezeichneten Falle β würde z. B. der rechts gelegene Teil des zweiten Feldes stärker werden, als der linke Teil.

Nun wäre aber auch der Fall denkbar, dass eine sehr bedeutende Kapazität im Stromkreise oder eine ähnlich wirkende Ursache vorhanden wäre; diese veranlasst bekanntlich ein Voreilen der Welle des Stromes vor der Welle der EMK, verursacht also eine negative Phasenverschiebung. Dergleichen Fälle werden nicht sehr häufig vorkommen; es könnte aber doch ähnliches stattfinden, wenn z. B. eine Wechsel-

strommaschine, deren Anker sehr geringe Selbstinduktion hätte, durch ein viele Meilen langes konzentrisches Kabel auf einen induktionslosen Widerstand (Glühlampen) arbeitete, so dass die Kapazität im Stromkreise grösser wäre, als die Selbstinduktion. In einem solchen Falle würde der Strom schon sein Maximum erreichen, während sich die Spule s noch im Bereiche des vorhergehenden entgegengesetzten Poles befindet. Dieser würde dann durch die Rückwirkung der Spule eine Verstärkung erfahren, weil seine durch die Erregerwindungen erzeugten Kraftlinien und die von dem Strome der Spule erzeugten Kraftlinien gleichgerichtet wären.

Man erkennt aus dieser Betrachtung, dass das Magnetfeld bei einer positiven Phasenverschiebung, wenn infolge eines Überwiegens der Selbstinduktion der Strom hinter der EMK zurückbleibt, durch die Rückwirkung des Ankers eine Schwächung erleidet, dass aber im Falle einer negativen Phasenverschiebung, wenn die Kapazität im Stromkreise überwiegt, das Magnetfeld, wegen der Voreilung des Stromes vor der EMK, durch die Ankerrückwirkung eine Verstärkung erfährt.

Durch die Selbstinduktion erfährt bekanntlich ausserdem, ähnlich wie durch den Widerstand, der von der Maschine erzeugte Strom eine Verringerung, weil sie den scheinbaren Widerstand, die Impedanz des Leiters, vergrössert; andererseits wird aber auch durch die erzeugte Phasendifferenz das Magnetfeld geschwächt, beide Gründe veranlassen somit eine Verminderung der vom Anker erzeugten EMK und des Stromes.

Infolge der eigenen Selbstinduktion der Maschine, besonders aber bei starker Belastung durch Motoren, wird daher jede Wechselstrommaschine einen mit steigender Stromstärke wachsenden Fall der Klemmenspannung zeigen.

Diese Thatsache war Veranlassung, dass man lange Zeit die Selbstinduktion des Ankers möglichst gross machte. Bei Kurzschluss wurde bei solchen Maschinen die Ankerrückwirkung so stark, dass die Stromstärke nur eine mässige Höhe erreichte, durch die eine Beschädigung der Wickelung nicht zu befürchten war. Dazu kam, dass man glaubte, Wechselstrommaschinen mit grosser Selbstinduktion liessen sich leichter in Parallelschaltung gebrauchen, als Maschinen mit geringer Selbstinduktion.

Durch praktische Versuche Mordey's ist jedoch nachgewiesen worden, dass die Grösse der Selbstinduktion für den Synchronismus parallel geschalteter Wechselstrommaschinen von geringer Bedeutung ist.

Neuerdings baut man daher die Wechselstrommaschinen mit geringer Selbstinduktion, so dass bei induktionsloser Belastung durch

Glühlampen der störende Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollbelastung nicht mehr als 4—5% beträgt. Bei ausschliesslicher Belastung durch Motoren ist dann der Spannungsabfall noch immer 15—20%.

Die Selbstinduktion des Ankers einer Wechselstrommaschine ist der Zahl der Kraftlinien, dem Quadrate der Zahl der Windungen und der Anzahl der Polwechsel in der Zeiteinheit proportional; die Anzahl der Kraftlinien ist aber angenähert der Stromstärke und der Windungszahl proportional und hängt ausserdem von der Permeabilität der Substanzen ab, in denen die Kraftlinien verlaufen.

Wollten wir die Selbstinduktion verringern, so müssten wir nur wenige Windungen auf den Anker anbringen; um dann noch dieselbe EMK zu induzieren, müssten wir viel stärkere Felder anwenden. Ausserdem könnte man, um die Selbstinduktion herabzusetzen, mit niedriger Wechselzahl arbeiten; das letztere ist aber oft nicht möglich, weil, wenn die Frequenz unter 40 in der Sekunde herabgeht, das Licht von Glühlampen mit dünnen Kohlenfäden und das der Bogenlampen zu flimmern anfängt. Auch die Verminderung der Permeabilität ist nicht ratsam, weil die Kraftlinien der Feldmagnete auch durch das Medium, das die Spulen ausfüllt, hindurch gehen müssen, und man den Erregerstrom sehr steigern muss, wenn der Widerstand des magnetischen Stromkreises vergrössert wird.

Zur Verkleinerung der Selbstinduktion des Ankers einer Wechselstrommaschine bleiben daher nur als Ausweg die Verminderung der Zahl der Windungen und die Erhöhung der Feldstärke. Beides lässt sich nur durch Vergrösserung der Querschnitte der Maschine und Erhöhung der Kosten der Herstellung erreichen.

Da es aber ausserdem eine grosse Zahl von Fällen giebt, für die eine gewisse Selbstinduktion nicht sonderlich schädlich ist, so baut man in der Praxis die Maschinen lieber kleiner und billiger und nimmt ein gewisses Mass von Selbstinduktion mit in den Kauf.

Da aber sowohl die Selbstinduktion als bei positiver Phasenverschiebung die Ankerrückwirkung mit der Stromstärke wächst, so nimmt bei gleichbleibender Erregung der Feldmagnete mit zunehmender Stromstärke die vom Anker entwickelte EMK ab, und dies um so mehr, je grösser die Selbstinduktion des Ankers ist.

Für gewöhnlich wird dieser Spannungsabfall dadurch ausgeglichen, dass man den Erregerstrom, der die Windungen der Feldmagnete umfliesst, verstärkt. Um dies ausführen zu können, legt man in den Stromkreis der Gleichstromquelle, die den Erregerstrom liefert, einen Regulierwiderstand. Will man den Erregerstrom verstärken, so schaltet man einen Teil des Widerstandes aus.

Da aber ein solches Regulieren durch die Hand oder durch eine selbstthätige Vorrichtung auch gewisse Nachteile hat, so wird, um diesem Übelstande zu begegnen, bei manchen Maschinen ein konstanter Bruchteil des Ankerstromes kommutiert und als intermittierender Gleichstrom in demselben Sinne um die Feldmagnete herumgeführt, wie der sonst zur Erregung dienende Gleichstrom. Bei passender Wahl der Verhältnisse kann man es dahin bringen, dass die Erregung der Feldmagnete in demselben Masse wächst, wie durch die Selbstinduktion und die Ankerrückwirkung die Spannung bei wachsender Ankerstromstärke abnimmt. Solche Wechselstrommaschinen zeigen dann bei verschiedener Belastung gleiche Klemmenspannung; sie führen den Namen Gleichspannungsmaschinen, Maschinen mit gemischter Erregung, oder Compoundmaschinen.

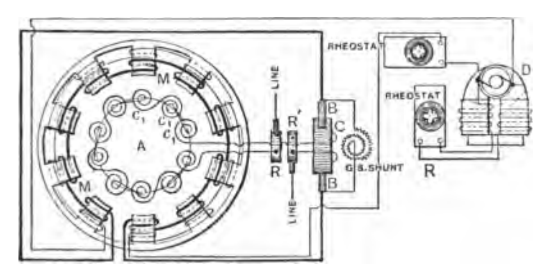


Fig. 64. Schematische Darstellung einer Wechselstrommaschine mit gemischter Erregung.

Anmerkung. Die nebenstehende Fig. 64 erläutert in schematischer Darstellung die Einrichtung einer solchen Wechselstrommaschine mit gemischter Wickelung. Die rechts abgebildete kleine Gleichstrommaschine D, deren Feldstärke durch einen kleinen Nebenschlussregulator W geregelt werden kann, sendet den erzeugten Strom durch einen Regulierwiderstand in zahlreichen Windungen (mit dünnen Linien gezeichnet) um die Feldmagnete M derWechsel strommaschine und bringt Pole von wechselnden Vorzeichen hervor. Die Spulen $C_1 C_1 C_1$ des rotierenden Ankers A erzeugen Wechselstrom, der zu den auf der Ankerachse befestigten Schleifringen $R R_1$ und von da zu einem ebenfalls auf der Ankerachse angebrachten Kommutator C geht. Während auf den Schleifringen $R R_1$ Schleiffedern ruhen, die den Wechselstrom nach aussen in die Hauptleitung abführen, sind die Bürsten BB des Kommutators, die intermittierenden Gleichstrom empfangen, durch einen Nebenschluss von hohem Widerstande mit einander verbunden, um die Funkenbildung zu vermindern. Der kommutierte Gleichstrom wird nun ebenfalls in einigen Windungen (dicke Linien) in passender Richtung um die Elektromagnete geführt. Da diese Windungen einen Nebenschluss von konstantem Widerstande zum Anker bilden, wird ein bestimmter Bruchteil des Ankerstromes um die Feldmagnete geführt. Bei stärkerem Ankerstrom wird auf diese Weise der die Feldmagnete erregende Strom verstärkt und dadurch eine stärkere Induktion in den Ankerspulen verursacht. Die Phasenverschiebung zwischen EMK und Strom wird aber dadurch nicht völlig beseitigt werden.

Bei Maschinen, die mit wenig veränderlicher Stromstärke arbeiten, versieht man die Feldmagnete von Anfang an mit einer etwas stärkeren Bewickelung, um die Ankerrückwirkung auszugleichen. (Vergl. S. 104 Gl. 27.)

13. Die Grösse der Selbstinduktion eines Ankers.

Die Selbstinduktion des Ankers einer Wechselstrommaschine ist eine veränderliche Grösse; selbst der sogenannte Selbstinduktionskoeffizient L ist je nach der Kraftliniendichte, zumal wenn sich Eisen im Anker befindet, und nach der Stellung, die der Anker im Felde einnimmt, etwas verschieden.

Bezeichnet man mit f die Feldstärke, die durch einen Strom von 1 absoluten Stromeinheit (= 10 Ampère) in einer Windung des Ankers erzeugt wird und mit Z die Anzahl der Windungen einer Spule, so ist

$$L = Z^2 \cdot f \qquad 17)$$

der Selbstinduktionskoeffizient dieser Spule. Enthält der Anker 2p Spulen, so ist der Selbstinduktionskoeffizient des Ankers

$$L = 2p\,Z^2 f \qquad 18).$$

Um diesen Selbstinduktionskoëffizienten L einer Maschine zu messen, senden wir einen Wechselstrom, der dem von der Maschine zu liefernden, an Stärke und Wechselzahl gleich ist, durch den ruhenden Anker, während die Feldmagnete normal erregt sind, und messen den Spannungsunterschied E an den Ankerklemmen, die Stromstärke J und den Ohm'schen Widerstand w des Ankers.

Da nun die Formel gilt:

$$J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + \omega^2 \cdot L^2}} \qquad 19),$$

so kann, da alle Grössen ausser L bekannt sind, L angenähert berechnet werden.[1])

14. Der Gang für die Berechnung von Wechseltsrom-Maschinen.

Man geht zunächst aus von der Formel

$$\frac{p\,u}{60} = \sim$$

und bestimmt aus der Frequenz $\sim$ und der Umlaufszahl u die Anzahl der Polpaare p:

$$p = \frac{60 \cdot \sim}{u} \qquad 20)$$

[1]) $\omega = 2\pi \sim$, wenn $\sim$ die Frequenz ist.

Die Umlaufszahlen sowohl, als die Frequenz $\sim$ sind in den weitaus meisten Fällen durch die Zwecke bestimmt, für die eine Maschine konstruiert werden soll. Diese Grössen können daher als gegeben angesehen werden.

Weiter stützt man sich auf die Formel 10 (Kap. IV, 11., S. 93)

$$E = \frac{K \cdot p \cdot \Phi \cdot m \cdot u \cdot 10^{-8}}{60}$$

die man auch in der Form:

$$E = k \cdot \Phi \cdot m \cdot \sim \quad \ldots\ldots\ldots \quad 21)$$

schreiben kann, wenn man das Produkt $K \cdot 10^{-8}$ durch den Buchstaben k ausdrückt.

Ist die Anzahl Kraftlinien in der Flächenheit des Feldes B, und s der Querschnitt einer dem Anker zugekehrten Polfläche, so ist

$$\Phi = B_{max}\, s \quad \ldots\ldots\ldots \quad 22)$$

und hiernach:

$$E = k \cdot B_{max} \cdot s \cdot m \cdot \sim \quad \ldots\ldots \quad 23)$$

Durch die Wahl der Maschinentype, d. h. durch die Entscheidung über die Polbreite, Breite des Zwischenraumes und Breite und Dicke der Spulen ist der Faktor K, damit auch k und ausserdem auch die Zahl P der Spulen bestimmt, die auf dem Anker untergebracht werden müssen.

Es ist nun:

$m = P \cdot m'$ bei Maschinen mit Ringankern

$m = 2\, P \cdot m'$ bei Maschinen mit Trommel- und Scheibenankern,

wenn m' die Zahl der Windungen in einer Spule bezeichnet. Danach wird:

$$s \cdot m' = \frac{E}{k \cdot B_{max} \sim \cdot P} \text{ od. } s \cdot m' = \frac{E}{2k \cdot B_{max} \sim \cdot P} \quad \ldots \quad 24)$$

Für die Grösse B_{max} wählt man einen Wert zwischen 3000 und 5000.

Sehr gute Dienste zu einer vorläufigen Bestimmung der Grösse der gesamten Polflächen in qcm leistet eine von G. Kapp in seinen Vorträgen an der Technischen Hochschule in Charlottenburg gegebene Formel.

Bezeichnet man diese Polfläche mit F, die scheinbare Leistung der Maschinen (Spannung $\times$ Stromstärke) mit A, mit v die Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Teiles in Metern pro Sekunde, mit p die Anzahl der Polpaare, so ist:

$$A = Q \cdot F \cdot p \text{ oder } F = \frac{A}{Q \cdot v \cdot p} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 25)$$

Die Konstante Q hat für Einphasenmaschinen einen Wert zwischen 0,5 und 0,8. Bei Drehstrommaschinen liegt der Betrag von Q zwischen 0,7 und 1.

Aus F und p kann die Grösse s ermittelt werden. Gleichung 23 giebt dann m′, die Zahl der Windungen einer Spule.

Durch die Wahl von B_{max} ist dann das Eisenvolumen bestimmt. Den Wattverlust im Eisen H wählt man für Wechselstrommaschinen meist nicht höher als 1 % der geforderten Leistung. H ist somit gegeben.

Nun ist

$$H = V \cdot \sim \cdot \eta \cdot B_{max}^{1,6},$$

wobei η ein von Steinmetz gegebener Zahlenfaktor (vgl. Kap. III, 5., S. 67) und V das effektive Eisenvolumen des Ankers ist. Hieraus kann man

$$V = \frac{H}{\sim \cdot \eta \cdot B_{max}^{1,6}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 26)$$

das Eisenvolumen des Ankers ermitteln.

Da wegen der isolierenden Papierzwischenschichten V nur 0,85 des wirklichen Volumens des Eisenkörpers ist, kann dann hieraus auch das Volumen des Ankers selbst berechnet werden.

Durch Vergleich mit guten bekannten Konstruktionen können aus dem Volumen des Ankers und der Polfläche F dann auch der innere und äussere Durchmesser und die Breite des Ankers und damit die äusseren Abmessungen der Maschine überhaupt ermittelt werden.

Ein einfacher Weg zur sicheren Vorausberechnung von Wechselstrommaschinen ist bisher noch nicht veröffentlicht worden. Wir unterlassen es daher auch, den Gang der Rechnung an einem Beispiele zu verfolgen. Wir geben jedoch in den nachfolgenden Kapiteln einige massstäbliche Zeichnungen guter Wechselstrommaschinen, die als Anhalt dienen können.

Am einfachsten gestaltet sich der auf das Feld bezügliche Teil. Hierbei kommen genau dieselben Grundsätze zur Anwendung die schon (vergl. Grundzüge Kap. XX, 5., S. 314) bei Berechnung der Feldmagneten der Gleichstrommaschinen benutzt worden sind.

Für die Bestimmung der Anzahl der Ampèrewindungen, um welche die erregende Kraft der Feldmagnete zu vergrössern ist, um die Ankerrückwirkung auf das Feld auszugleichen, hat Kapp[1]) für den Fall, dass die Spulenbreite gleich der Breite der Polflächen und diese gleich dem halben Abstande zweier entgegengesetzter Pole ist, die Formel gegeben:

$$\lambda = 0{,}0156 \, m' \, i \, \varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 27)$$

Hierin ist m′ die Zahl der wirksamen Drähte einer Ankerspule, i die Stromstärke im Anker und φ der Winkel der scheinbaren Phasenverschiebung in Bogengraden.

[1]) Kapp, Dynamomaschinen für Gleichstrom und Wechselstrom. S. 282.

15. Die Ankerwickelung.

Um aufeinanderfolgende Spulen des Ankers einer Wechselstrommaschine ohne Überkreuzung der Drähte hinter einander schalten zu können, benutzt man den naheliegenden Kunstgriff, dass man rechts herum und links herum gewickelte Spulen auf einander folgen lässt. Die Figur 65 zeigt ein Stück des Feldmagnets und des Ankers einer alten Wechselstrommaschine von Siemens & Halske unter Weglassung aller verbindenden Teile. Da Wechselstrommaschinen zumeist, wenn auch nicht ausschliesslich, für die Erzeugung von Strömen hoher Spannung hergestellt werden, so ist besonders Wert darauf zu legen, dass nicht Drähte sehr nahe bei einander liegen, in welchen

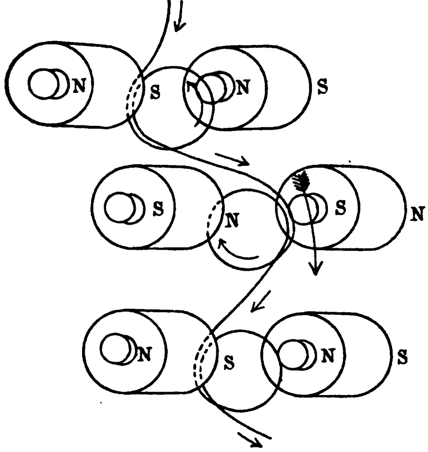


Fig. 65. Schaltung der Ankerspulen bei einer älteren Wechselstrommaschine von Siemens & Halske.

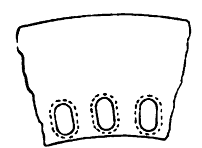


Fig. 66. Lochanker.

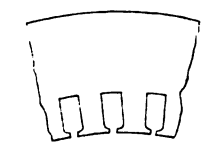


Fig. 67. Nutenanker mit übergreifenden Zähnen.

wesentlich verschiedene Spannungen herrschen; aus demselben Grunde müssen die Drähte des Ankers von einander und von den übrigen Metallteilen auf das sorgfältigste isoliert werden. Die Ankerwickelung besteht je nach der Spannung und der Stromstärke, die von der Maschine geliefert werden soll, aus Kupferstäben, Kupferlitze oder Kupferdraht.

Diese Leitungsmaterialien werden, soweit dies irgend bei der betreffenden Maschinenart angängig ist, in das Innere des Ankereisens eingebettet, weil durch das benachbarte Eisen die Entstehung von Wirbelströmen im Inneren stärkerer Kupferleitungen sehr gedämpft wird. Man benutzt daher entweder Lochanker, d. h. man legt die gesamte Ankerwickelung in Öffnungen ein, die möglichst nahe

der Ankeroberfläche durch das Ankereisen geführt sind (vgl. Fig. 66), oder man benutzt Nutenanker mit übergreifenden Zähnen (vergl. Fig. 67). Der letzten Anordnung hat man neuerdings zumeist den Vorzug gegeben, weil dann die Wickelung sich leichter herstellen lässt, und der Verlust an Kraftlinien, die, ohne von der Wickelung geschnitten zu werden, durch den engen Steg sich schliessen, in Wegfall kommt. Selbstverständlich muss das zur Wickelung verwendete Kupfer dann zunächst mit besonders gutem, womöglich nahtlosem Isoliermaterial umgeben und die isolierten Leiter müssen wieder durch Umwickelung mit Glimmer noch weiter geschützt werden.

Da die meisten neueren Maschinen für einphasigen oder mehrphasigen Wechselstrom als Innenpolmaschinen gebaut sind, wollen wir für diese Anordnung die Art der Ankerwickelung darlegen. Wir wählen als Beispiel die Konstruktion, wie sie von S i e m e n s & H a l s k e bei den Wechsel- und Drehstrommaschinen angewendet wird, die mit der Modellbezeichnung R versehen sind (vergl. Fig. 68).

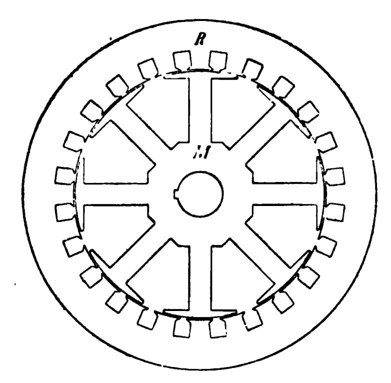


Fig. 68. Gestalt der Eisenteile einer Wechselstrommaschine von Siemens & Halske (Mod. R).

Diese Maschinen haben einen feststehenden Anker R, der aus von einander durch Papier isolierten Eisenblechringen besteht, in diesem Hohlcylinder rotieren die Feldmagneten M. Um Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme möglichst auszuschliessen, sind sowohl die Eisenkörper des Ankers als auch die Kerne der Feldmagneten aus von einander isolierten Eisenblechen zusammengesetzt, die durch isolierte Bolzen zusammen gehalten werden.

Der Stern von Feldmagneten ist auf der rotierenden Maschinenwelle befestigt.

Die Kerne der Feldmagneten M sind von den Erregerwindungen umgeben (in der Fig. 68 nicht gezeichnet); der Erregerwickelung wird Gleichstrom durch zwei auf der Welle befestigte Schleifringe zugeführt. Bürsten, die auf diesen Schleifringen aufliegen, stehen mit der Quelle des Erregerstromes, einer kleinen Gleichstrommaschine oder einer Akkumulatorenbatterie in Verbindung.

Um die gestanzten Bleche, aus welchen der Anker besteht, für verschiedene Maschinengattungen, einfache Wechselstrommaschinen und Mehrphasenmaschinen, verwenden zu können, werden dieselben mit so vielen Nuten versehen, als überhaupt unter Umständen er-

forderlich sein können. Bei Maschinen für einphasigen Wechselstrom werden nicht alle Nuten mit Wickelungen versehen.

Wir erkennen aus Fig. 68 und ebenso aus Fig. 69, dass ein Polschuh gerade drei Nuten überdeckt, und dass der Abstand der zugewendeten Seiten zweier benachbarter Nuten gleich dem Zwischenraume zwischen zwei auf einander folgenden Magnetpolen von entgegengesetztem Vorzeichen ist.

Um eine günstige Ausnutzung der Drahtlänge einer Spule zu erhalten, denken wir uns zunächst in die Nuten 1 und 4 (Fig. 69 und Fig. 70) eine Spule gewickelt. Denken wir uns den Stern der Feldmagneten in der Richtung des Uhrzeigers rotierend, so werden durch die Einwirkung des vor der Nute 1 stehenden Nordpoles und des vor der Nute 4 stehenden Südpoles E M Kräfte induziert, die sich unterstützen und einen in der Richtung des Pfeiles verlaufenden Strom hervorrufen (Fig. 69). In der nächsten Stellung (Fig. 70) steht vor der Nute 1 ein Südpol und vor der Nute 4 ein Nordpol; die induzierten

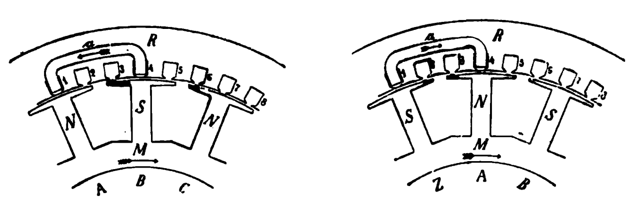


Fig. 69. Fig. 70.
Induktion im Anker einer Wechselstrommaschine.

E M Kräfte haben nunmehr entgegengesetzte Vorzeichen, sie unterstützen sich wieder und erzeugen einen entgegengesetzt gerichteten Strom.

Wenn ein Pol von der Stellung A in die Stellung C übergegangen ist, hat der in der Spule erzeugte Wechselstrom eine volle Periode durchlaufen.

Um bei solcher Anordnung der Spulen die Ankeroberfläche möglichst vollständig auszunutzen, könnte man mit der Spule a den Hohlraum der Nuten 1 und 4 halb voll wickeln. Mit der zweiten Spule b würde man dann die zweite Hälfte von Nute 4 füllen und die erste Hälfte von Nute 7 u. s. f.

Man erkennt sofort, dass man bei derartiger Anordnung der Ankerwickelung hinsichtlich des Wickelraumes sehr beschränkt ist.

Bei den meisten neueren Maschinen für einphasigen Wechselstrom, den Wechselstrommaschinen im engeren Sinne, verfährt man aber so, dass man die erste Spule a in die Nute 1 und 3, die zweite benachbarte Spule b in die Nuten 4 und 6, die dritte Spule c in 7

und 9 u. s. f. wickelt (vergl. Fig. 71). Durch diese Verminderung der Spulenbreite um ein Drittel und dadurch, dass die Spulen nicht dicht neben einander, sondern in Zwischenräumen liegen, wird allerdings die E M K für jede einzelne Spule um ungefähr 13 % erniedrigt, dafür aber kann man in den Hohlraum jeder Nute nunmehr doppelt so viele Windungen einlegen und im Verhältnis von 3 : 4 mehr Spulen auf der Ankeroberfläche unterbringen als vorher. Man erzielt also noch immer einen namhaften Gewinn entweder, wenn man jede Spule aus doppelt so vielen Windungen herstellt, in der gesamten E M K des Ankers, oder in der Stromstärke, wenn man zur Wickelung Leitungsmaterialien von doppeltem Querschnitte verwendet.

Die Spulen a und c befinden sich zu gleichsinnigen Polen in genau übereinstimmender Lage, in ihnen wird somit E M K von genau gleicher Phase erzeugt. Die in der Spule b erzeugte E M K ist der in a und c induzierten zwar gleich, aber entgegengesetzt gerichtet.

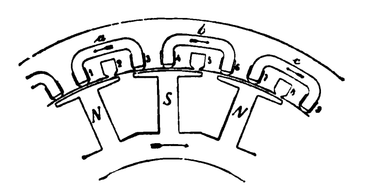


Fig. 71. Veränderte Ankerwickelung einer Wechselstrommaschine.

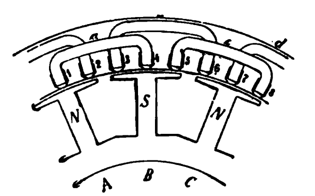


Fig. 72. Ankerwickelung einer Drehstrommaschine.

Man hat daher das Ende von a mit dem Ende von b und den Anfang von b mit dem Anfange von c zu verbinden u. s. f.

Die Nuten 2, 5, 8 bleiben bei der Wickelung von Ankern einfacher Wechselstrommaschinen leer.

Bei der Drehstrommaschine werden alle Nuten für die Wickelung benutzt (Fig. 72). Spule a wird in die Nuten 1 und 4, Spule b in die Nuten 3 und 6, Spule c in die Nuten 5 und 8 gewickelt u. s. w.

Da die Nuten 1, 3 und 5 einerseits und die Nuten 4, 6 und 8 andererseits um je ein Drittel des Winkels von einander abstehen, den die Mittellinie eines Poles, z. B. A, in einer Periode durchläuft, so sind die in den drei Spulen a, b und c erzeugten elektromotorischen Kräfte um je ein Drittel der Periode gegen einander verschoben. Die dann folgende Spule d hat wieder Strom von genau derselben Phase wie Spule a, ebenso haben die Spulen b und e, endlich c und f Ströme gleicher Phase. Man kann also wieder a, d, . . ., ferner b, e, . . . und c, f, . . . hintereinander schalten. Man hat nun drei Stromkreise mit Strömen, die um je ein Drittel der Periode (120°) gegen einander verschoben sind. Diese drei Zweige werden in der

Regel in Sternschaltung mit einander verbunden, d. h. die drei Enden werden mit einander vereinigt (im sogenannten Nullpunkt), und die drei Anfänge werden zu den drei Klemmen geführt, von denen der Strom zum Verbrauche abgenommen wird.

Die Einbettung des Ankerkupfers in das Ankereisen, welches zuerst von Wenström und von der Maschinenfabrik »Oerlikon« eingeführt worden ist, wird neuerdings von fast allen Konstrukteuren für Wechselstrommaschinen angewendet.

Bei Ankern mit aus einzelnen Kupferstäben bestehenden Wickelungen (Stabwickelung) werden diese Kupferstäbe samt ihrer Isolation meist wirklich in Löcher des geblätterten Ankereisens eingelegt. Wo es sich um die Einlagerung von eigentlichen Spulen handelt, die aus mehreren Windungen bestehen, wie dies z. B. bei Maschinen für Erzeugung hochgespannten Wechselstromes nötig wird, ist dies nicht wohl angängig. Dann werden diese Löcher nach Vollendung des Aufbaues des Ankereisens aufgefräst, so dass die in Fig. 66 dargestellte Form des Nutenankers mit übergreifenden Zähnen entsteht, und in diese Hohlräume werden die über Schablonen fertig gewickelten und sorgfältig isolierten Spulen eingesetzt. —

Die Einbettung der Ankerwickelung in das Ankereisen bietet gerade für Wechselstrommaschinen besondere Vorteile dar. Die Wickelungen können besser vor Beschädigung der Isolation geschützt werden; die seitlichen Verschiebungskräfte, die auf stromdurchflossene Drähte von den vorübergehenden Magnetpolen ausgeübt werden, werden von den Wänden des Kanals aufgenommen, man kann unbedenklich den Luftraum zwischen Ankereisen und Eisen der Feldmagnete auf ein Minimum verringern. Wegen der Verminderung des magnetischen Widerstandes kann man mit sehr geringem Energieaufwand für die Felderregung auskommen. [1]) Diese eben erwähnten Vorteile gelten übrigens gleichmässig für Gleichstrom- und für Wechselstrommaschinen.

---

[1]) Sehr geringe Luftzwischenräume zwischen Ankereisen und Eisen der Feldmagnete sind freilich auch Veranlassung, dass die Ankerrückwirkung sehr merklich wird.

5. Kapitel.

Die Einrichtungen einiger gebräuchlicher Wechselstrommaschinen.

A. Maschinen mit Ringanker.

1. Maschinen von G. Kapp.

Als charakteristisches Beispiel der Wechselstrommaschinen mit Ringanker kann die äusserst sorgsam durchgearbeitete Maschine dieser Art von G. Kapp dienen.

Zwei parallele, kreisförmige, gusseiserne Jochringe J J (Fig. 73) tragen zwei sich gegenüber stehende Reihen von Elektromagneten EEE, deren Kerne aus Schmiedeeisen hergestellt sind. Die Kerne enden auf der dem Anker zugewendeten Seite in Polschuhen von fast rechtwinkliger Gestalt und sind auf der anderen Seite durch Schrauben in den Jochringen befestigt. Die Gestalt der Polschuhe und die Verbindung der Spulen lässt die in vergrössertem Massstabe gezeichnete Fig. 74 erkennen. Es stehen sich jedesmal zwei Nordpole auf beiden Seiten des Ankers gegenüber, auf diese folgen zwei sich gegenüberstehende Südpole u. s. f. Der aus den Polflächen austretende Kraftlinienstrom teilt sich somit jedesmal in zwei Teile (vergl. Fig. 56, S. 89). Zwischen den Magnetpolen rotiert ein Flachringanker, auf dem die Spulen s, s, s aufgewickelt sind. Der Ankerkern wird dadurch hergestellt, dass man auf einen gusseisernen Ring ein gut ausgeglühtes Eisenband von wenigen Millimetern Dicke zu einem Ringe aufwickelt. Um die einzelnen Lagen des Ringes von einander zu isoliren und die Entstehung von Foucaultströmen einzuschränken, wird das Eisenband vor dem Aufwickeln auf der einen Seite mit dünnem Papier beklebt. Durch Speichen S, S, S wird der gusseiserne Ring mit einer Nabe verbunden, die ihrerseits auf der Ankerwelle aufsitzt und durch Stellringe in der passenden Lage festgeschraubt wird. Um diesen Ring sind ebenso viele Spulen gewickelt, als Pole vorhanden sind. Die Breite jeder Spule ist wenig geringer als der halbe Polabstand. Die Erregung der Wickelung der Feldmagnete geschieht durch eine kleine Gleichstromdynamo, deren Anker auf der Ankerwelle der

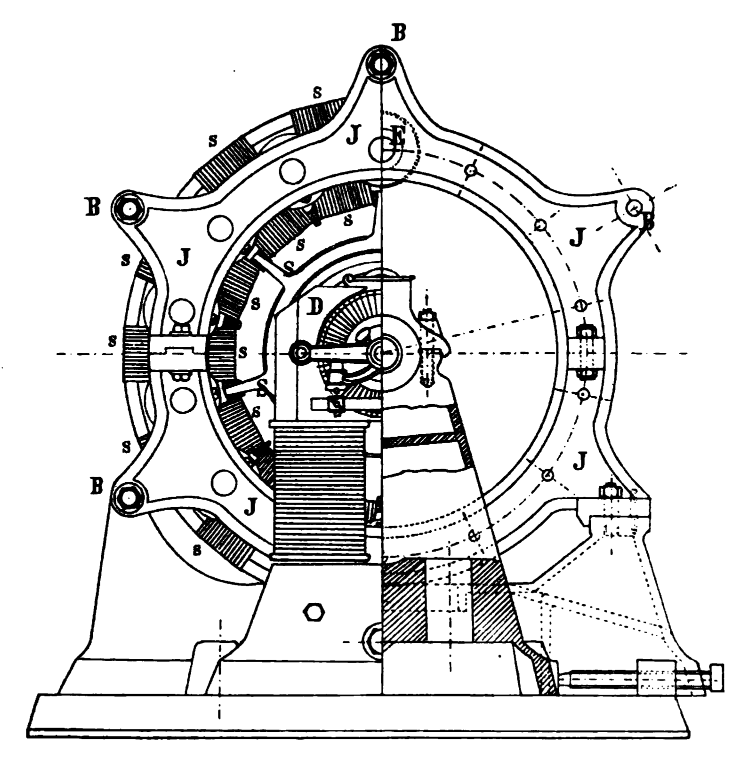


Fig. 73. Wechselstrommaschine mit Ringanker von G. Kapp.

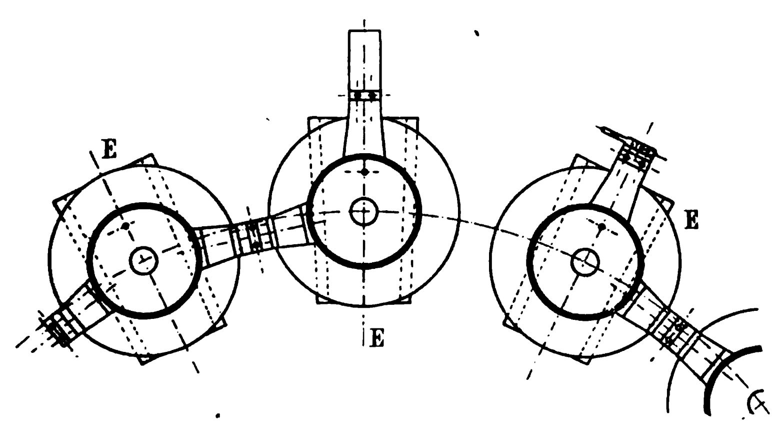


Fig. 74. Anordnung und Verbindung der Elektromagneten einer Kapp'schen Wechselstrommaschine.

Wechselstrommaschine befestigt ist. Auf der linken Seite der massstäblich gezeichneten Figur ist die Hälfte dieser Erregermaschine D samt ihren wesentlichen Bestandteilen angedeutet.

Die Abnahme des Wechselstromes erfolgt durch Schleifringe und Bürsten, die auf beiden Seiten des Ringes angeordnet sind, so dass eine gleichzeitige Berührung beider Maschinenpole unmöglich ist. Wir geben im Nachstehenden nach eigenen Angaben Kapps die Abmessungen für eine derartige Maschine von 60 Kilowatt, die bei 500 Umläufen des Ankers in einer Minute 58 volle Perioden des Wechselstromes in einer Sekunde giebt und bei 30 Ampère Stromstärke eine Spannung von 2000 Volt liefert.

Der Durchmesser des Kreises, auf dem sich die Mitten der Feldmagnetkerne befinden, beträgt 1000 *mm*, die Dicke des bewickelten Flachringes 90 *mm*, der Luftzwischenraum zwischen dem Eisen des Ankers und den zugewendeten Flächen der Polschuhe $\delta = 14$ *mm*.

Das Ankereisen ist mit 14 hinter einander geschalteten Spulen bedeckt, deren jede aus zwei Lagen von je 40 und 39 Windungen aus rundem Kupferdraht von 3 *mm* Dicke (3,5 *mm* isoliert) besteht. Es sind somit 1106 Ankerwindungen vorhanden, zu deren Herstellung eine Drahtlänge von ungefähr 800 *m* erforderlich ist.

Die Feldmagneten, deren Eisenkern eine Dicke von 105 *mm* und eine freistehende Länge von 19 *cm* besitzen, sind mit 6 Lagen von je 31 Windungen eines Drahtes von 5 *mm* Dicke (5,8 *mm* isoliert) bewickelt. Die Länge des zu einer Spule erforderlichen Drahtes beträgt ungefähr 90 *m*. Die Polschuhe haben eine Dicke von 22 *mm*.

Die Klemmenspannung bei verschiedenen Stärken des Erregerstromes und verschiedenen Ankerstromstärken ist aus dem Diagramm Fig. 75 zu ersehen. Derartige Kurven, die man erhält, wenn man die Anzahl der zur Erregung verwendeten Ampèrewindungen als die eine Ordinate, die Klemmenspannungen als die andere Ordinate aufträgt, nennt man die Charakteristik der Maschine. Man kann aus denselben leicht das Verhalten einer Maschine unter verschiedenen Umständen erkennen.

Man sieht z. B., dass bei konstanter und normaler Erregung der Feldmagnete durch etwa 21 Ampère Stromstärke der Spannungsabfall vom Leerlauf bis zur Vollbelastung mit 30 Ampère bei Belastung durch induktionsfreie Widerstände ungefähr 280 Volt, d. i. 14 %, beträgt.

Da der Widerstand der 14 Spulen der Feldmagnete ungefähr 1,76 ω (in warmem Zustande) beträgt, so beträgt der Energieaufwand für die Erregung des Magnetfeldes $i^2 \cdot \omega = 21^2 \cdot 1{,}76 = 780$ Watt, d. i. nur 1,4 % der Leistung der Maschine.

Obgleich die Polschuhe abgeschrägt sind, um zu plötzliche Änderungen der Feldstärke zu vermeiden, weicht die Kurve, durch welche die EMK als Funktion der Zeit dargestellt wird, nicht unerheblich von der Sinuslinie ab.

Es bedarf kaum der Erwähnung, dass man bei Maschinen dieser Art auch mit nur einem Kranze von Feldmagneten auskommen könnte, wenn man die Feldstärke derselben verdoppelte. Ebenso ist es leicht ersichtlich, dass man auch bei solchen Maschinen den Anker ruhen lassen und die Feldmagnete in Rotation versetzen könnte.

Wenn man den Ring in der Richtung der Achse zu einem Hohlcylinder auszieht und die rotierenden Feldmagnete als Innenpole ausbildet, kommt man auf die von Gramme konstruierte Form der Wechselstrommaschine.

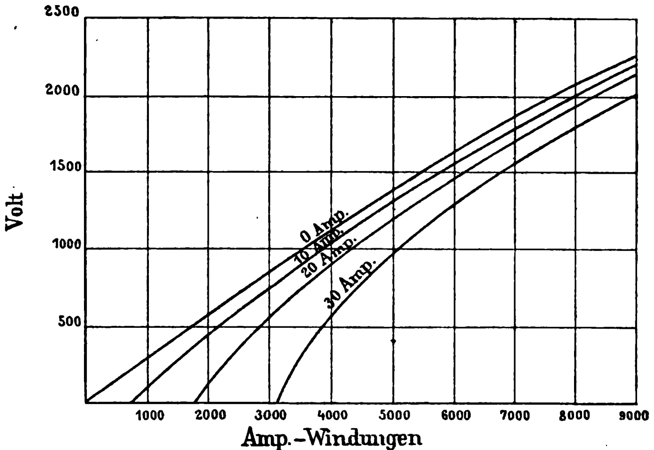


Fig. 75. Verlauf der Klemmenspannung der Kapp'schen Wechselstrommaschine bei verschiedener Ankerstromstärke und verschiedener Erregung der Feldmagneten.

2. Die Wechselstrommaschine der Aktien-Elektrizitäts-Gesellschaft Kummer & Co. (konstruiert von Fischinger)

kann als Beispiel für eine Konstruktion mit Ringanker und einem Kranz von Aussenpolen dienen. Bei der hier in Fig. 76 a, b, c, d, in Vorderansicht, Seitenansicht und Schnitten abgebildeten Maschine für etwa 17 Kilowatt sind 14 Aussenpole von abwechselnd entgegengesetztem Vorzeichen vorhanden. Sowohl die rechteckigen Kerne der feststehenden Feldmagnete K als das Eisen des Ankerringes R sind zur Verminderung der Wirbelströme aus dünnen, von einander isolierten Eisenblechen zusammengebaut.

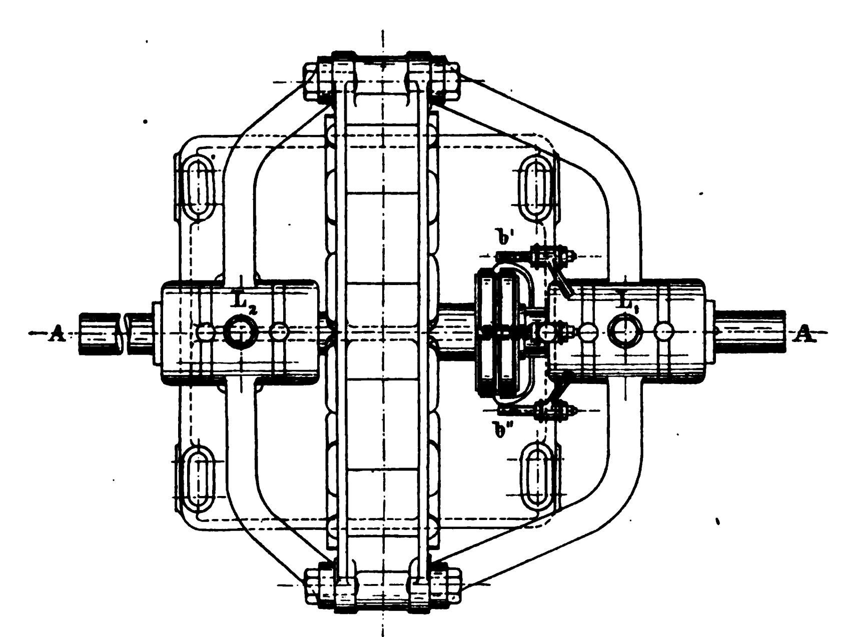


Fig. 76. Grundriss der Wechselstrommaschine der Aktien-Elektrizitäts-Gesellschaft vorm. Kummer & Co. (konstruiert von Fischinger).

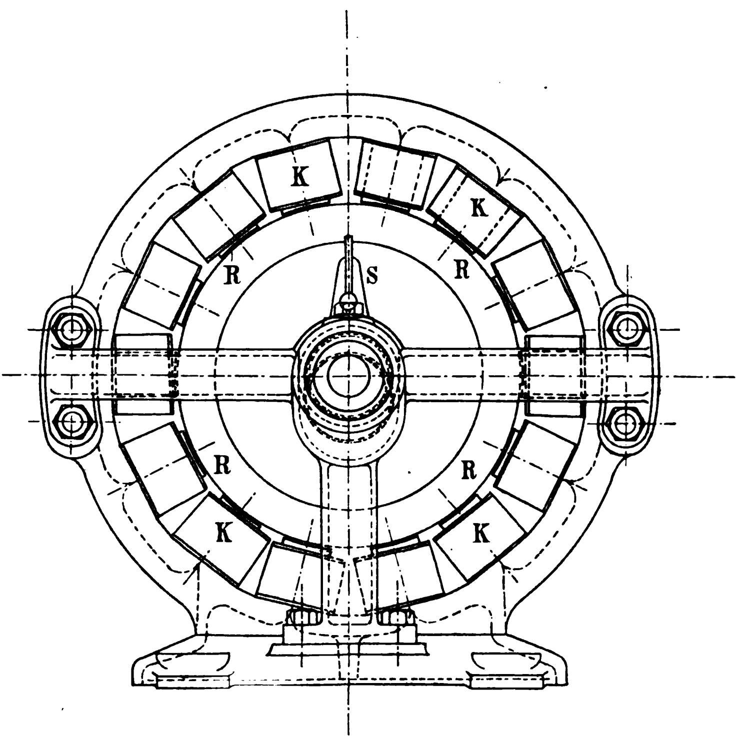


Fig. 76a. Vorderansicht.

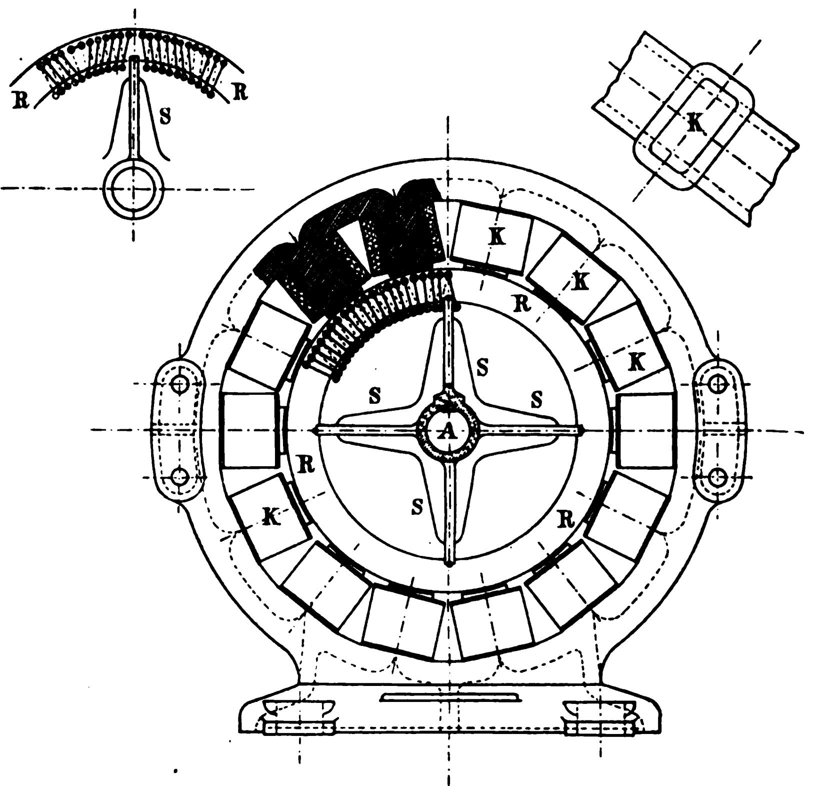


Fig. 76b. Durchschnitt.

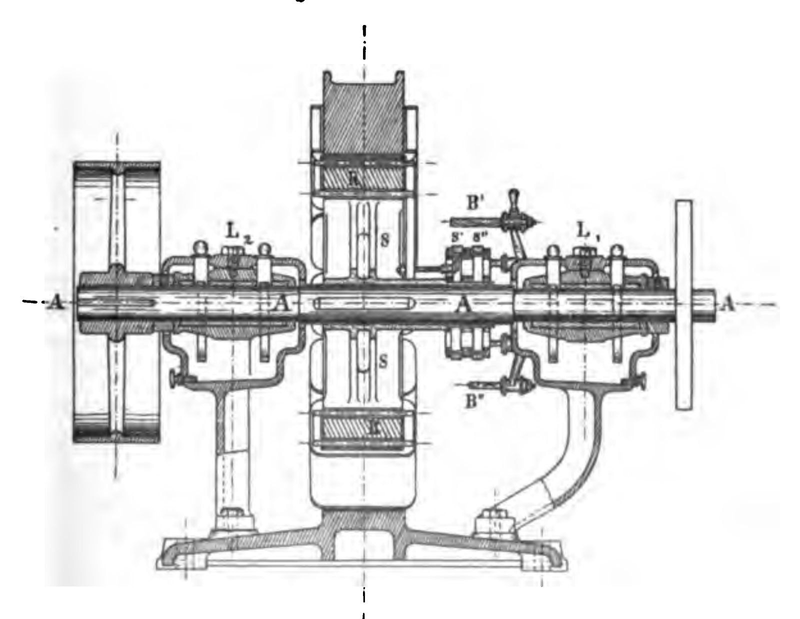


Fig. 76c. Achsenschnitt.

Der Querschnitt des Ringeisens ist nahezu rechteckig. Die Wickelung des Ankers ist nahe der Aussenfläche desselben durch Löcher geführt, während innen die Windungen auf dem Ankereisen aufliegen.

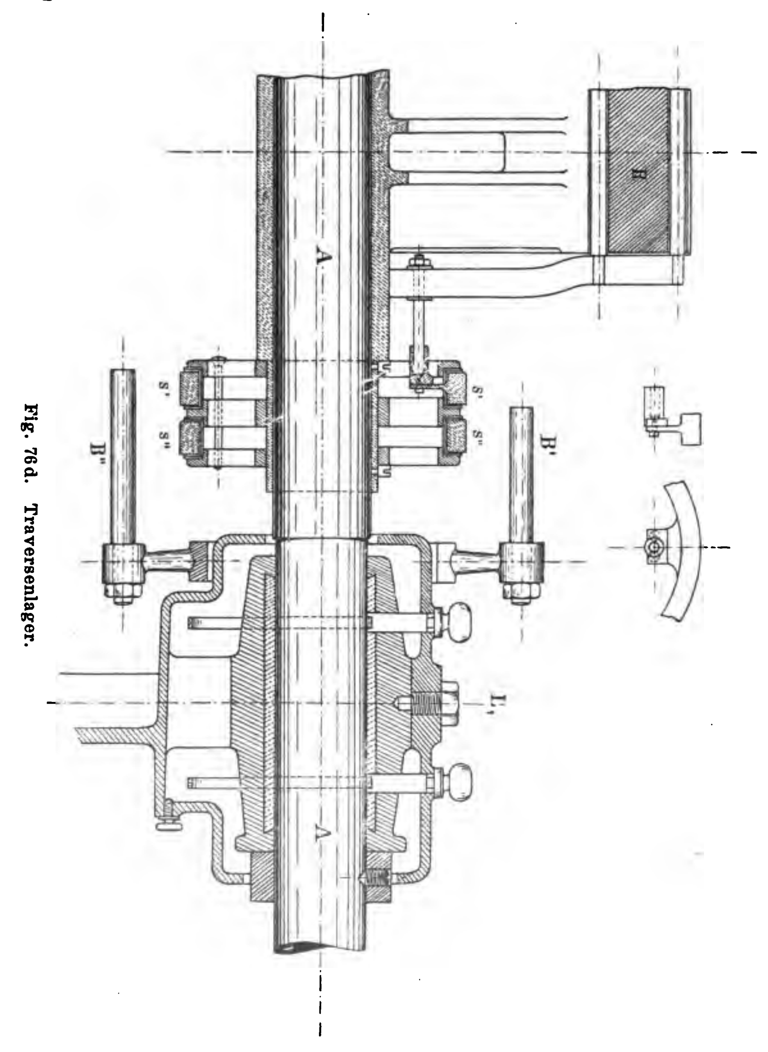


Fig. 76d. Traversenlager.

Durch den Rotgussstern SS ist der Ring R mit der rotierenden Ankerwelle AA fest verbunden. Die beiden Enden der Ankerwickelung werden zu zwei mit dem Anker rotierenden Schleifringen s′s″ geführt. An dem Traversenlager L_1, das in Fig. 76d

noch für sich in vergrössertem Massstabe abgebildet ist, befinden sich die zum Tragen der Bürstenhalter bestimmten Bolzen B'B'', b'b''. Auf jedem Schleifringe s's'' schleifen somit, um einen guten Kontakt herzustellen, zwei Bürsten, die unter einander verbunden sind. Die breiten mit selbstthätiger Ringschmierung versehenen Lager $L_1 L_2$ sichern eine gute Centrierung der Ankerachse AA.

Die Maschine giebt bei einer Erregung der Feldmagnete mit 235 Watt bei 430 Umläufen einen Strom von 235 Ampère, eine Spannung von 72 Volt und 50 Perioden in 1 Minute.

Die Ringwickelung besteht aus 112 Kupferstäben von je 12 *mm* Durchmesser dicken Drahtes.

8. Gleichstrommaschinen mit Einrichtungen zur Abgabe von ein- und mehrphasigem Wechselstrome.

An dem einfachen Beispiele einer gewöhnlichen zweipoligen Grammemaschine mit Ringanker wollen wir ferner zeigen, dass jede gewöhnliche Gleichstrommaschine ohne weiteres als Wechselstrommaschine zur Erzeugung einfachen Wechselstromes oder mehrerer in der Phase verschobener Wechselströme dienen kann.

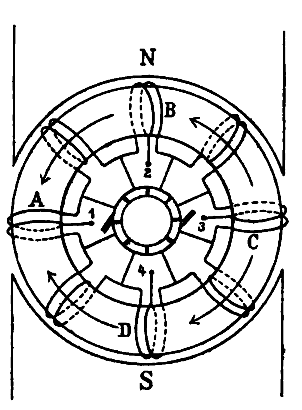


Fig. 77 Gebrauch einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine als Wechselstrommaschine.

Bekanntlich wird in jeder Windung des Ankers einer Gleichstrommaschine Wechselstrom induziert. Gehen wir aus von der Fig. 77. Solange eine Windung sich auf der oberen Hälfte des Ringes durch die Stellungen A, B bis C bewegt, wird EMK in dem einen Sinne induziert, und wenn die Windung sich weiter von C über D und A bewegt, wird ein entgegengesetzt gerichteter Strom induziert.

Wenn man daher stets von zwei bestimmten Punkten der Wickelung Strom entnimmt, z. B. an den Punkten 1 und 3, so erhält man einen Wechselstrom, der eine volle Periode vollendet, während der Ringanker eine volle Umdrehung macht.

Es geschieht dies in einfacher Weise dadurch, dass man z. B. auf den Kollektor der Gleichstrommaschine zwei von den Segmenten isolierte kupferne Schleifringe aufzieht, und den einen Schleifring mit einem Segment, den anderen Schleifring mit dem um 180° gegenüberliegenden Segment des Kollektors leitend verbindet. Durch zwei

Bürsten, die auf diesen Schleifringen schleifen, kann man dann Wechselstrom abnehmen.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass die maximale induzierte EMK dieses Wechselstromes gleich der EMK e_0 ist, die die Maschine als Gleichstrommaschine geben würde. Der zur Zeit t stattfindende Wert e der EMK würde:

$$e = e_0 \,.\, \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

und der effektive Wert der EMK

$$e_{eff} = \frac{e_0}{\sqrt{2}} = 0.71 \cdot e_0.$$

Entnimmt man der Maschine die effektive Stromstärke

$$i_{eff} = \sqrt{2} \cdot i_0,$$

so ist das Ringeisen und der Kupferdraht der Wickelung genau so beansprucht, als ob man bei Gleichstrom der Maschine die Stromstärke i_0 entnimmt.

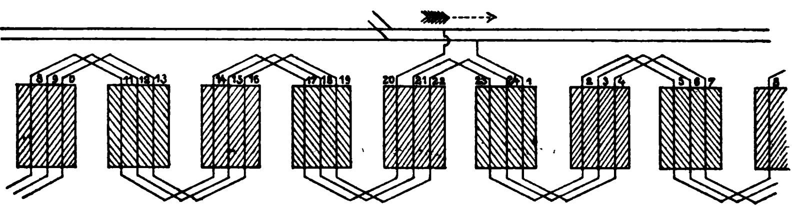


Fig. 79. Doppelte Wellenwickelung des Ankers der Wechselstrommaschine von Blakey-Emmott.

Die Leistung der Maschine ist $e_{eff} \cdot i_{eff}$, wenn die Belastung nur aus induktionsfreien Widerständen (Glühlampen) besteht, und:

$$J \cdot E = \frac{J \cdot e_0}{\sqrt{2}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

d. h. als Wechselstrommaschine verwendet, bleibt die Leistung um 29% hinter ihrer Leistung als Gleichstrommaschine zurück.

Wenn man den Kollektor einer beliebigen Gleichstrommaschine mit solchen Schleifringen versieht, kann dieselbe somit als selbsterregende Wechselstrommaschine, als Gleichstrom-Wechselstromumformer oder, wenn man ihr Wechselstrom von geeigneter Frequenz zuführt, als Wechselstrom-Gleichstromumformer verwendet werden.

Es bedarf wohl kaum der besonderen Erwähnung, dass, wenn man eine Gleichstrommaschine mit p Polpaaren verwendet, man die Segmente des Kollektors, die um einen Winkel von $\frac{180^0}{p}$ von einander abstehen, mit dem einen Schleifringe und die in der Mitte dazwischen

liegenden Kollektorsegmente mit dem zweiten Schleifringe leitend verbinden muss.

Man kann aber auf dem Kollektor einer Gleichstrommaschine auch z. B. 4 Schleifringe aufsetzen, oder in obiger Fig. 79 die Punkte 1 und 3 mit dem einen Paare und 2 und 4 mit dem anderen Paare von Schleifringen verbinden, dann giebt 2 und 4 ebenfalls einen Wechselstrom ab, der aber um 90° in der Phase gegen den von 1 und 3 abgegebenen Wechselstrom verschoben ist. Die Gleichstrommaschine wird dann als Zweiphasenmaschine verwendet.

Ebenso könnte man drei Wechselströme, die in der Phase um 120° gegeneinander verschoben sind, oder sogenannten Drehstrom entnehmen, wenn man 3 Bürsten auf Schleifringen schleifen liesse, die an Kollektorsegmente angeschlossen wären, die um 120° (bei einer zweipoligen Maschine) von einander abständen. Durch Verbindungen zwischen je zwei der von den drei Schleifringen ausgehenden Leitungen würde ein Wechselstrom fliessen, und die drei auf diese Weise möglichen Wechselströme würden Phasenunterschiede von 120° zeigen. Man könnte in dieser Weise noch beliebig weiter gehen.

Die effektive EMK, wenn Phasenstrom entnommen wird, ist

$$e_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e_0 \cdot \sin \frac{\pi}{f} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

Hierin bedeutet e_0 die EMK, die von der Maschine unter sonst gleichen Verhältnissen als Gleichstrommaschine gegeben wird, und mit f ist die Zahl der unabhängigen Spulengruppen der Ankerschaltung, beziehentlich die Anzahl der Phasen, bezeichnet.

Die zuletzt betrachteten Fälle entsprechen einer sogenannten geschlossenen Verkettung der Ströme; auch eine offene Verkettung nach dem Prinzip der später zu erwähnenden Stromschaltungen ist möglich.[1]) Mit Rücksicht auf die geringe praktische Bedeutung solcher Fälle sehen wir jedoch davon ab, dies hier weiter auseinanderzusetzen. — Wir haben die Möglichkeit solcher Schaltungen jedoch hier erwähnt, da man in Laboratorien leicht auf diese Weise Maschinen für Experimente vorrichten kann.

B. Wechselstrommaschinen mit Trommelanker.

Es giebt vielverbreitete Wechselstrommaschinen, die Trommelanker besitzen. Ganz besonders eignet sich für Maschinen mit nicht zu hoher Spannung einfache und mehrfache Wellenwickelung, weil

[1]) Vergl. Friese, E.-T. Z., Bd. XV 1894, S. 101 u. s. f.

bei diesen eine vorteilhafte Ausnutzung der Drahtlänge erreicht werden kann. Bei hohen Spannungen bereitet die Isolierung der

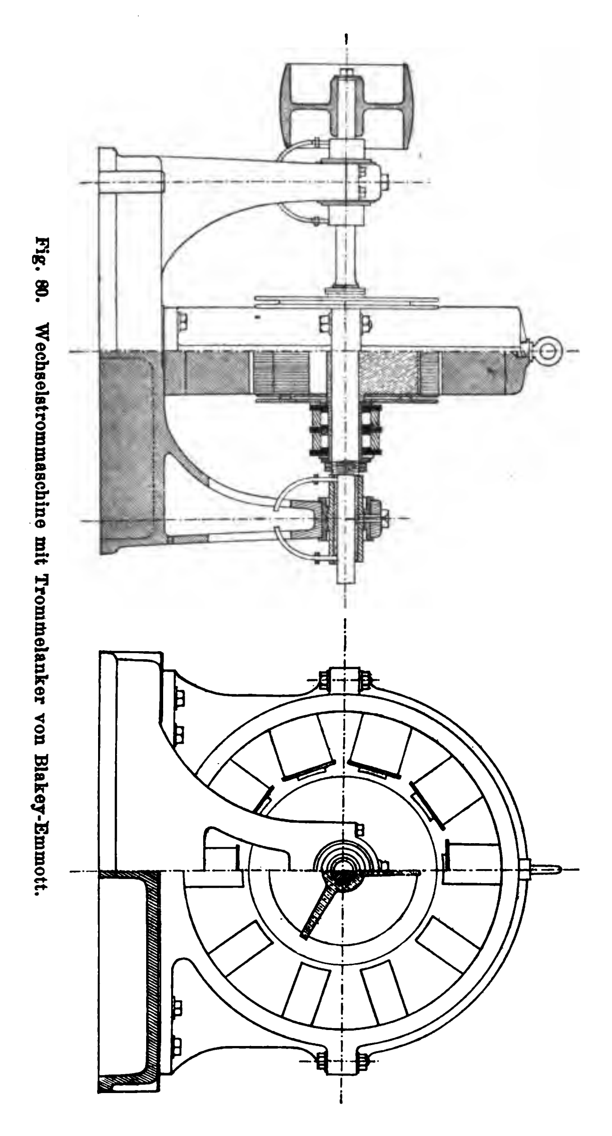


Fig. 80. Wechselstrommaschine mit Trommelanker von Blakey-Emmott.

Ankerdrähte allerdings grosse Schwierigkeiten. Das vorstehende Wickelungsschema (vergl. Fig. 79) stellt z. B. die Wellenwickelung auf der Oberfläche des Ankers einer vielpoligen

3. Wechselstrommaschine mit Fremderregung von Blakey-Emmott & Co. (Halifax)

dar. Die Wickelung wird aus Bändern hergestellt, die aus mehrfach nebeneinander gelegten, von einander isolierten Kupferdrähten bestehen. Die in der Fig. 79 als Winkel gezeichneten Verbindungen der wirksamen Ankerdrähte liegen auf der Stirnfläche des Ankers. Bei der in Fig. 80 abgebildeten 10poligen Maschine der Vorgenannten, die bei 1200 Umläufen 2000 Volt Klemmenspannung bei 7.5 A Stromstärke und eine Frequenz von 100 Perioden in einer Sekunde ergiebt, ist der Anker aus sehr dünnen Scheiben von Holzkohleneisen hergestellt. Die einzelnen Scheiben sind von einander durch dünnes Papier und Lack isoliert und sind auf einen Stern aus Rotguss aufgereiht, der auf der Ankerwelle festgekeilt ist. Um das Auftreten von Wirbelströmen in der Ankerwickelung zu vermindern, ist es zweckmässig, die Ankerdrähte in das Eisen selbst einzubetten, also entweder Lochanker (vergl. Grundzüge, Kap. XII, 1., S. 347) oder Nutenanker mit über die Nut zum Teil übergreifenden Vorsprüngen des Eisens zu verwenden. (Vergl. Fig. 69 u. 70.)

Selbst ein sorgsames Unterteilen stärkerer Querschnitte des Ankerdrahtes in mehrere parallele, aber von einander isolierte Litzen wirkt nicht entfernt so vorteilhaft auf die Beseitigung parasitischer Ströme in der Ankerwickelung, als die möglichst vollkommene Einbettung derselben in das Ankereisen.

Der Anker der hier abgebildeten Maschine hat 1140 wirksame Drähte und besitzt einen Widerstand von 4.48 Ohm. Der Ankerdurchmesser beträgt 46 *cm*.

Der zeitliche Verlauf der in den Ankerdrähten induzierten EMK ähnelt sehr einer Sinoide.

Die Maschine gehört, wie man sieht, zu den Aussenpolmaschinen. Die obere Hälfte des Kranzes von Feldmagneten kann nach Lösung der Verbindungsschrauben abgehoben und dadurch der Anker zugänglich gemacht werden.

Die Kerne der Feldmagneten wurden früher massiv hergestellt; infolge der in den Enden der Pole induzierten Wirbelströme erwärmten sich dieselben jedoch beträchtlich. Um diesen Übelstand zu beseitigen, zieht man neuerdings vor, auch die Feldmagnete aus dünnen, von einander isolierten Blättern von weichem Eisen herzustellen. Die Trennungsflächen verlaufen dabei selbstverständlich rechtwinklig zu den Ankerdrähten.

In der äusseren Gestalt sind der soeben beschriebenen sehr ähnlich die

4. Wechselstrommaschinen der Westinghouse-Company (Stanley).

Der Eisenkern des Ankers ist ebenfalls aus dünnen, von einander isolierten Scheiben aus Walzblech hergestellt. In diese Bleche sind ausser den Nuten für die Aufnahme der Wickelung noch Löcher gestanzt, die nach Fertigstellung des Ankers der Achse parallel laufende Ventilationskanäle bilden. Zwei durchbrochene Rotgussscheiben bilden die seitlichen Begrenzungen des Ankers. Diese Scheiben haben eine Anzahl Vorsprünge, die zur Befestigung einer gleichen Zahl von Ankerspulen dienen Die Ankerspulen werden über Formen gewickelt, dann in die Ankernuten eingelegt und die Enden über die erwähnten Vorsprünge herabgebogen. Durch starkes Umwickeln mit isoliertem Bindedraht werden die Spulen dann in ihren Lagen gehalten. Die Fig. 81 zeigt eine Seitenansicht des Ankers und der darüberstehenden Feldmagneten und lässt erkennen, wie die Befestigung der Spulen auf den Endplatten durchgeführt worden ist. Damit nicht

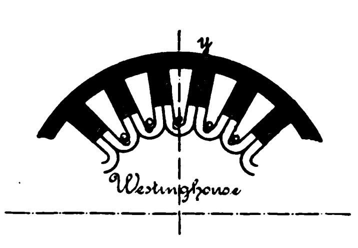


Fig. 81. Anker mit darüber stehenden Feldmagneten der Wechselstrommaschine der Westinghouse-Company.

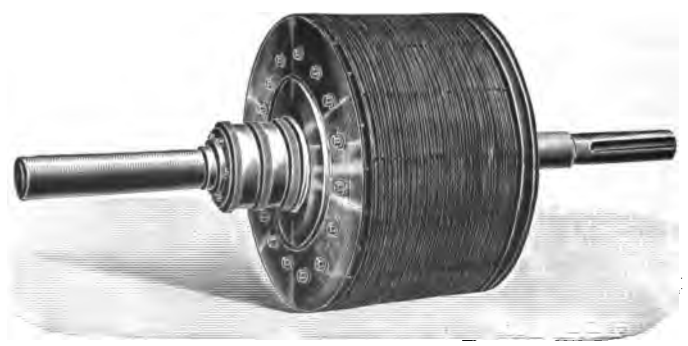


Fig. 82. Äussere Ansicht des fertigen Ankers einer Wechselstrommaschine der Westinghouse-Company.

Drähte mit sehr verschiedenen Spannungen in unmittelbare Berührung kommen, sind sowohl die geradzahligen als die ungeradzahligen Spulen hinter einander und diese beiden Gruppen parallel geschaltet,

Während die vorhergehende Abbildung nur eine schematische Darstellung ist, zeigt Fig. 82 den fertigen Anker einer solchen Maschine.

Besonders bemerkenswert ist die hohe Frequenz dieser Art von Maschinen, 144 volle Perioden in der Sekunde.

Die Einrichtung der Feldmagneten bietet nichts Abweichendes dar. Fig. 83 zeigt die äussere Einrichtung einer solchen Maschine, die bei 1080 Umläufen 145 Ampère bei 1100 Volt liefert, wenn die Feldmagnete durch einen Strom von 27 Ampère und 100 Volt erregt werden.

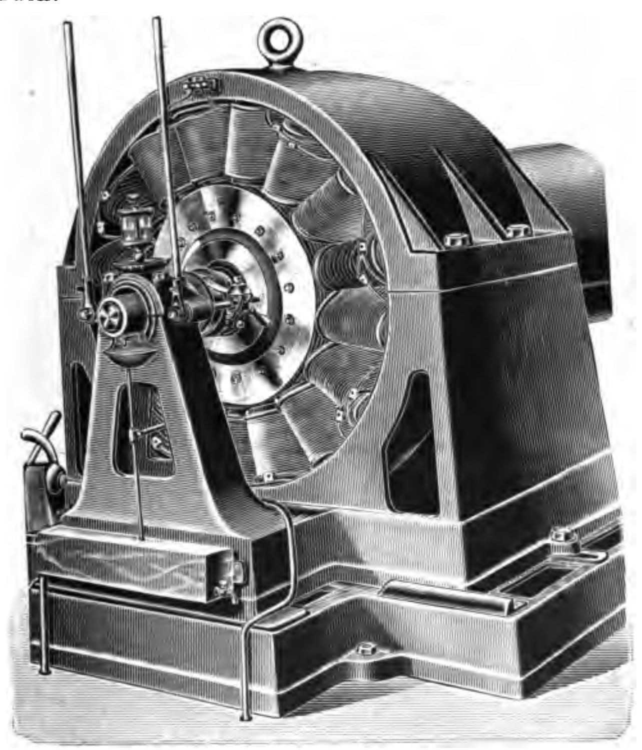


Fig. 83. Wechselstrommaschine der Westinghouse-Company.

Zu den Übergangsformen gehört

5. die neue Wechselstrommaschine von Siemens & Halske, Mod. R.

Diese Maschinen können als Maschinen mit Trommelanker mit Wickelung auf der Innenseite der Trommel angesehen werden. Den feststehenden Anker und die rotierenden Feldmagneten zeigt Fig. 84. Bei der einen Hälfte der rechtstehenden Figur sind die Elektromagneten im Durchschnitt gezeichnet, um die Gestalt des Kernes und die über die Spulen übergreifenden Polschuhe deutlich sichtbar zu machen.

Die Feldmagneten haben Kerne von länglich rechteckigem Querschnitt, die aus von einander isolierten weichen Eisenblechen

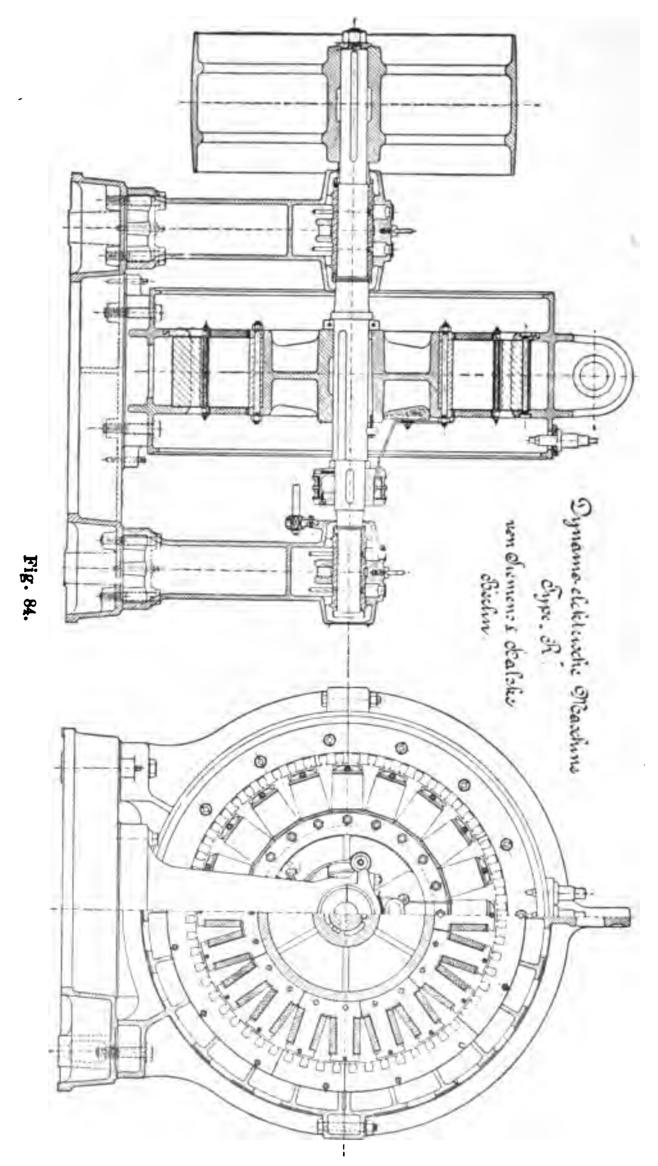


Fig. 84.

hergestellt sind; diese Kerne sind auf dem äusseren Umfange eines gusseisernen Schwungrades befestigt. Die Spulen der Feldmagneten

sind ebenfalls sorgfältig auf dem Umfange des Schwungrades befestigt.

Der Anker besteht aus zwei feststehenden gusseisernen Ringen, in deren Hohlräumen durch isolierte Bolzen die von einander isolierten eisernen Blätter befestigt sind, aus denen das Ankereisen zusammengesetzt ist. Die Ankerspulen sind in Nuten eingewickelt, wie wir das früher in Kap. IV, Abschn. 15, S. 107, näher beschrieben haben. Der Erregerstrom wird durch zwei Schleifringe aufgenommen, die mit

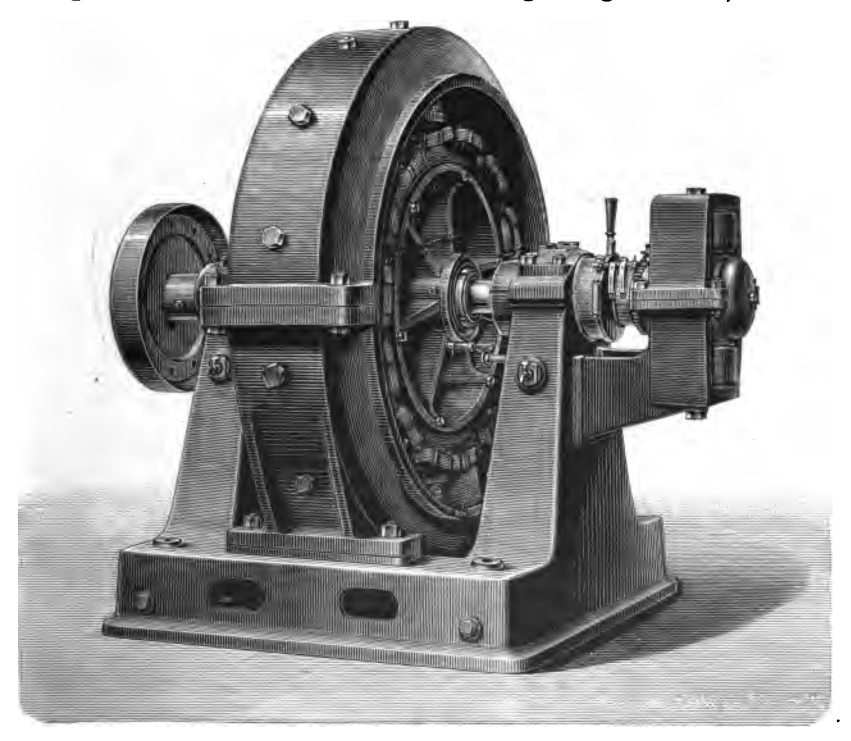


Fig. 85. Wechselstrommaschine von Brown, Boveri & Cie. mit rotierendem Anker.

Anfang und Ende der Wickelung der Feldmagnete in leitender Verbindung stehen. Diese Schleifringe sind in der links stehenden Figur auf der rechten Seite des Durchschnittes durch das Achsenlager zu sehen.

Die Entnahme des Wechselstromes vom feststehenden Anker erfolgt durch Klemmen, die sich am oberen Ende der Maschine befinden. Hinsichtlich der Wickelung des Ankers sind die auf S. 107 näher beschriebenen Kunstgriffe benutzt.

Die übrigen Einrichtungen erklären sich alle aus der nebenstehenden, massstäblich gezeichneten Figur.

6. Die Wechselstrommaschinen von Brown, Boveri & Cie.

Bei der in Fig. 85 abgebildeten Maschine mit rotierendem Anker und feststehendem Felde ist die Oberfläche eines rotierenden Trommelankers mit Spulen besetzt. Die Spulen sind in Löcher untergebracht, die ganz nahe dem Umfange durch das geblätterte Ankereisen geführt sind. Durch nahtlose Röhren eines um die Windungen gelegten Isolationsmateriales sind die Spulen gegen Berührungen mit

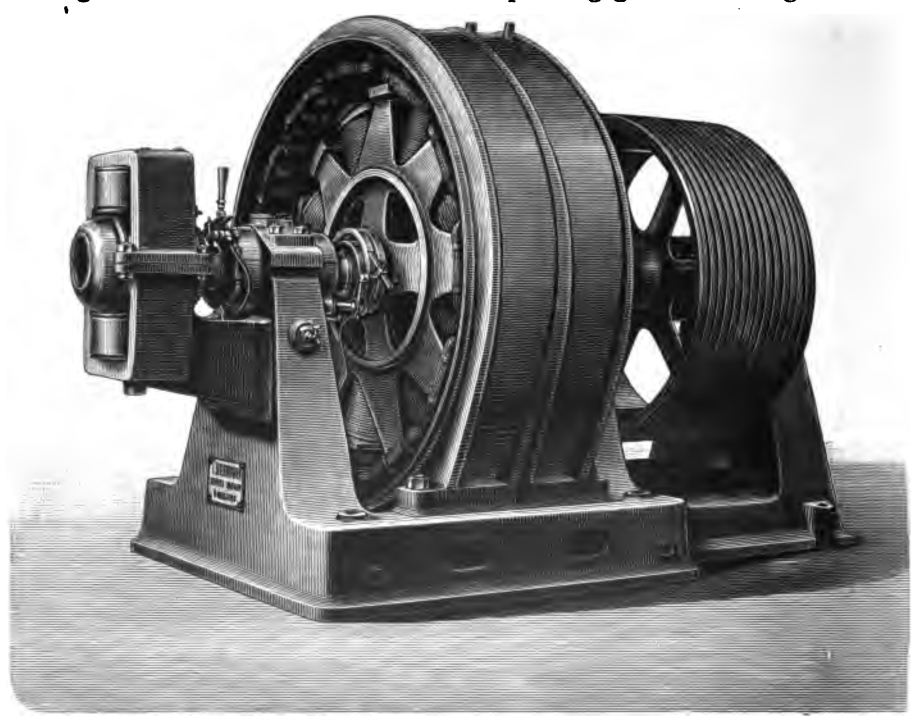


Fig. 86.
Wechselstrommaschine von Brown, Broveri & Cie. mit rotierendem Elektromagneten.

dem Eisenkörper vollständig geschützt. Der in den Spulen erzeugte Wechselstrom wird durch Schleifringe, die sich auf der Welle befinden, und feststehende Bürsten abgenommen.

Die Feldmagneten sind an das gusseiserne Maschinengehäuse angeschraubt; die Befestigungsschrauben sind am äusseren Umfange dieses zweiteiligen Gusskörpers in der Abbildung zu sehen. Jeder Kern des Feldmagneten wird mit einer Erregerspule versehen. Den Strom für die magnetisierenden Windungen liefert eine Erregermaschine, die unmittelbar an das Gestell der Wechselstrommaschine angebaut

ist. Der Anker dieser Gleichstrommaschine (rechts in der Fig. 85) ist fliegend auf die verlängerte Welle aufgesetzt; der Kollektor befindet sich auf der dem Lager zugewendeten Seite. Das Feld der Erregermaschine ist vierpolig, aber nur die zwei sich gegenüber stehenden Pole sind mit Magnetspulen versehen.

Das Gehäuse der Wechselstrommaschine ist zweiteilig. Wenn man die obere Hälfte abhebt, ist der Anker leicht zugänglich.[1])

Die oben genannte Firma baut aber auch Wechselstrommaschinen mit feststehendem, hohlcylindrischem Trommelanker und umlaufendem Feldmagneten. Eine derartige Maschine für Seilantrieb ist in Fig. 86 dargestellt. Auch bei dieser Anordnung sind die Ankerspulen in Löcher eingebettet, die sich ganz dicht unter der inneren Oberfläche des aus geblättertem Eisen hergestellten Ankerkörpers befinden.

Die Feldmagneten zeigen insofern besondere Eigentümlichkeiten, als nur jeder zweite Kern mit einer Erregerwickelung versehen ist, während die andern Kerne (in der Abbildung die dem Beschauer zugewendeten) nur zur Zurückführung der Kraftlinien dienen. Polschuhe mit einer Oberfläche aus geblättertem Eisen greifen nach innen über, so dass die Spulen von den Polschuhen völlig bedeckt werden.

Die Erregermaschine ist ganz so angeordnet, wie bei der zuvor beschriebenen Maschine. Der Gleichstrom wird zu zwei Bürsten geführt, die auf zwei auf der Welle befestigten Schleifringen aufliegen. Von diesen Schleifringen wird der Strom dann in die Wickelungen der Feldmagneten geleitet. Der im ruhenden Anker erzeugte Wechselstrom wird durch zwei an der oberen Seite des Gehäuses befindliche isolierte Röhren mittelst Kabel nach aussengeleitet.[2])

Die Konstruktionen mit rotierenden Feldmagneten werden besonders für grössere Maschinen bevorzugt.

Besonders geeignet ist diese Anordnung auch für Maschinen mit vertikaler Lage der Hauptwelle, die besonders dann gewählt wird, wenn der Antrieb durch eine mit der Welle direkt gekuppelte Turbine erfolgen soll.

C. Wechselstrommaschinen mit Scheibenanker.

Eine der ältesten, verbreitetsten und bewährtesten Einrichtungen dieser Art ist

[1]) Die Leistung dieser Maschine beträgt 120 Pferdestärken und zwar 2200 V. bei 37 A. Die Umlaufszahl ist 560. Der Anker hat 770 Drähte von 4 mm Dicke, der Eisenquerschnitt des Ankers beträgt 200 qcm. Die Feldmagneten tragen Spulen von 400 Windungen eines Drahtes von 4 mm Dicke. Widerstand der Magnetwickelung = 5,5 ω.

[2]) Die Wickelungsverhältnisse einer gleichgrossen Drehstrommaschine werden in Kap. VI, S. 160 mitgeteilt.

7. die ältere Wechselstrommaschine von Siemens & Halske.

Zwei Kränze von Elektromagneten sind als Feldmagneten auf zwei feststehenden gusseisernen Ringen angeordnet. Auf den beiden Seiten stehen sich immer entgegengesetzte Pole gegenüber, und ebenso wechseln auf derselben Seite entgegengesetzte Pole mit einander ab (vergl. Fig. 87).

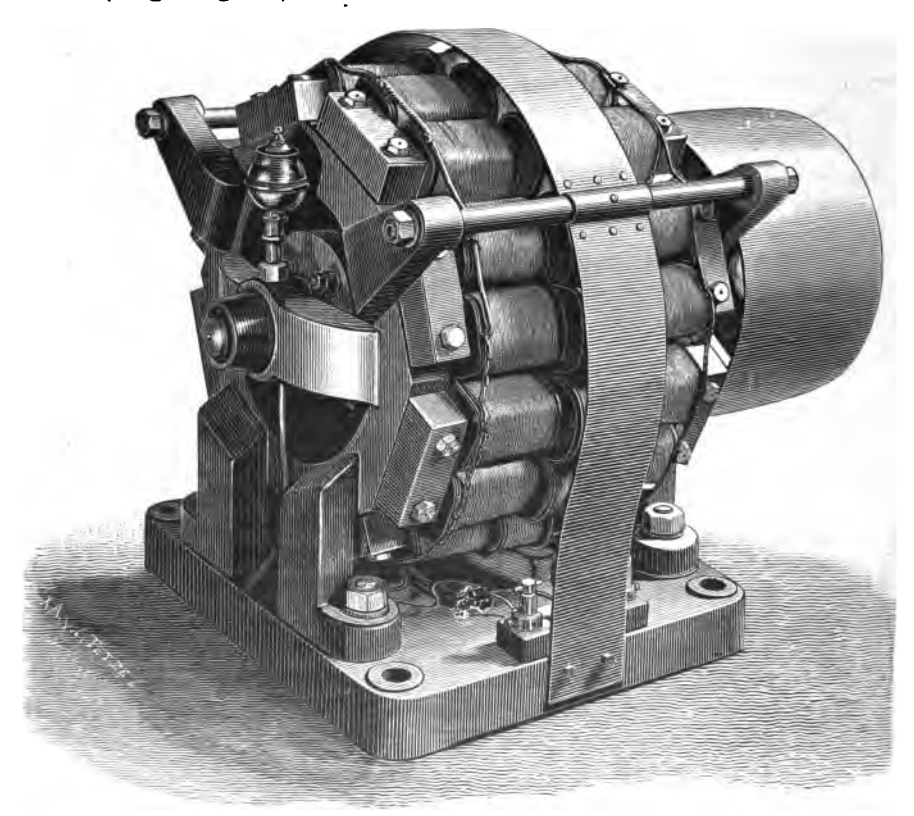


Fig. 87. Wechselstrommaschine von Siemens & Halske mit Scheibenanker.

In dem auf diese Weise entstandenen vielpoligen Felde rotiert ein Scheibenanker mit ebenso vielen Spulen, als Magnetfelder vorhanden sind. Die durch Rotation durch die Magnetfelder in den einzelnen Spulen erzeugten Ströme werden entweder getrennt, oder parallel, oder hintereinander, oder in Gruppen geschaltet an Schleifringe geführt, die mit einer Zwischenlage von Isolationsmaterial auf der Ankerwelle befestigt sind.

Die Abmessungen der Spulen und des Feldes sind so getroffen, dass, wenn die eine Seite einer Spule sich noch in dem einen Magnetfelde befindet, die andere Spulenseite sich bereits im nächsten Magnetfelde bewegt.

Bei den älteren Maschinen dieser Art waren die Kerne der Feldmagneten aus massivem Schmiedeeisen hergestellt, der Hohlraum der Ankerspulen war mit Holz ausgefüllt. Der Anker der Wechselstrommaschine enthielt also kein Eisen, der Querschnitt der Magnetkerne und der Spulen war kreisförmig. Bei den neueren Maschinen sind sowohl die Kerne der Feldmagnete als auch die Kerne der Ankerspulen aus dünnen Eisenblättern hergestellt, die durch aufgeklebtes Papier und Lack von einander isoliert sind. Zur Herstellung der Wickelung der Ankerspulen dient Kupferband. Durch zwischengelegte Streifen von Isolationsmasse werden die einzelnen Windungen von einander isoliert. Der Querschnitt der Kerne und Spulen ist bei den neueren Maschinen nahezu rechteckig geworden.

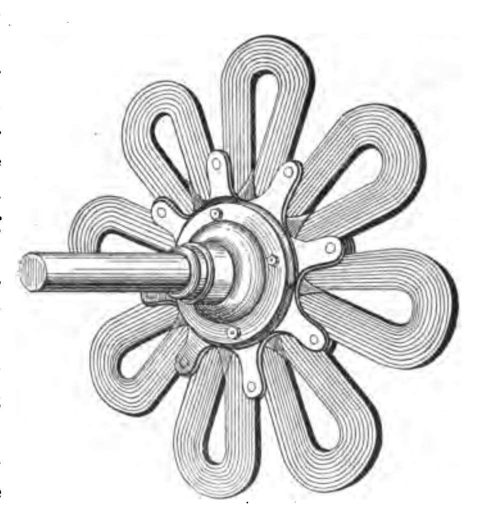


Fig. 88. Anker der älteren Wechselstrommaschine von Ferranti.

Zur Erregung der Feldmagnete dient der Strom einer kleinen Gleichstrommaschine.

Die äussere Ansicht einer Siemens'schen Maschine mit Eisen im Anker zeigt die Fig. 87. Ein grosser Vorteil dieser Konstruktion ist der, dass eine schadhaft gewordene Spule leicht ausgewechselt werden kann.

Bei Maschinen dieser Art nähert sich die Kurve der EMK besonders dann ausserordentlich der Sinoide, wenn kein Eisen im Innern der Ankerspulen enthalten ist. Der Energieaufwand für die Erzeugung des Magnetfeldes ist dann aber, wegen des grossen magnetischen Widerstandes des Weges der Kraftlinien, sehr gross.

Nur für kleine Maschinen wird diese Konstruktion noch verwendet.

Grosse Verwandtschaft im äusseren Ansehen und in der Einrichtung mit der vorstehend beschriebenen Maschine zeigt

8. die ältere Wechselstrommaschine von Ferranti.

Auch bei dieser Maschine bewegt sich der Anker zwischen einem doppelten Kranze von Feldmagneten.

Der Anker besitzt jedoch eine doppelte Wellenwickelung aus Kupferband.[1]) Der Abstand zweier benachbarter Windungen ist der Entfernung zweier Polmitten gleich. Die Entfernung der Pole von einander ist nur so gross, als gerade zur Unterbringung der Erregerwickelung nötig ist (vergl. Fig. 88), so dass eine sehr gute Ausnutzung der Wickelung und ein sehr einfacher Aufbau erzielt wird. Die Befestigung dieser Wickelung auf der Ankerwelle durch einen Stern mit isolierten Bolzen wird durch die vorstehende Fig. 88 veranschaulicht.

Es ist ohne weiteres einzusehen, dass eine derartige Anordnung der Wickelung sich nur für kleinere Maschinen eignet, auch nicht für hohe EMKräfte verwendbar ist, da Windungen mit sehr verschiedener Spannung in grosse Nähe gebracht werden müssen. Ein Schadhaftwerden der Isolation an einer Stelle macht das Abwickeln

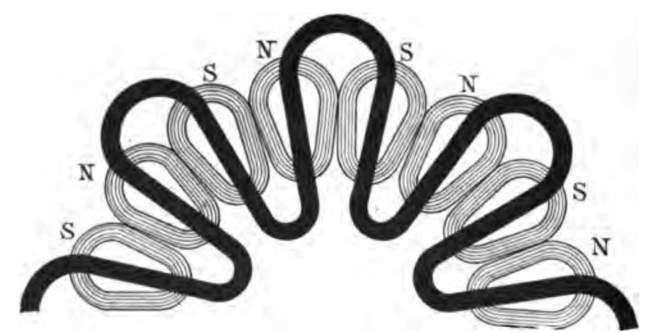


Fig. 89. Die Anordnung der Feldmagnete und Windungen bei der älteren Maschine von Ferranti.

des ganzen Ankers bis zur verletzten Stelle nötig; Ausbesserungen werden dadurch aufhältlich und kostspielig.

Ein besonderer Vorzug dieser Maschinen ist der geringe innere Widerstand und die niedrige Selbstinduktion des Ankers; infolge davon sind selbst bei ziemlich verschiedener Belastung die Änderungen der Klemmenspannung verhältnismässig gering.

9. Die neueren Wechselstrommaschinen von Ferranti

haben ebenfalls Scheibenanker, aber keine Wellenwickelung; es werden vielmehr wieder einzelne Spulen verwendet, die einzeln gewickelt und paarweise an einem messingenen Spulenhalter von der Form D (Fig. 90) befestigt werden. Zur Herstellung der Spulen

---

[1]) Unabhängig von Ferranti hatte auch Sir W. Thomson zu gleicher Zeit, i. J. 1882, den Vorschlag gemacht, eine solche Wellenwickelung für Scheibenanker zu verwenden.

dient gerunzeltes Kupferband; die einzelnen Windungen werden durch einen aufgepressten Streifen von Isolationsmaterial von einander getrennt. Das innere Ende der Wickelung ist mit dem aus Messingblättern hergestellten Kerne leitend verbunden. Die Spulen enthalten also kein Eisen. Die einzelnen Messingblätter des Kernes berühren sich unten und sind oben durch Asbest von einander und von der Wickelung isoliert.

In zwei zu einem Paare gehörenden Spulen hat der Strom somit entgegengesetzte Richtung. Das äussere Ende jeder Spule ist

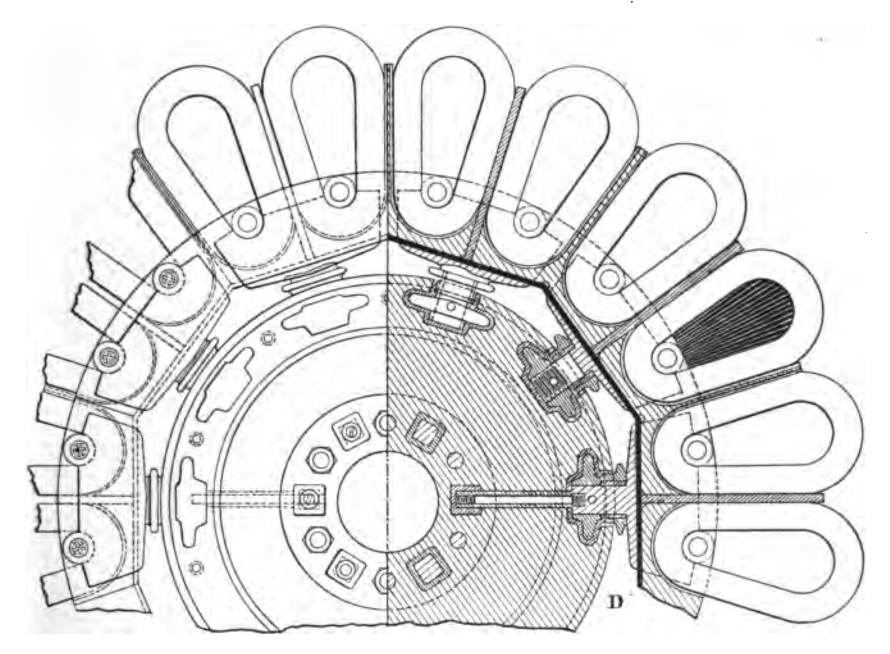


Fig. 90. Scheibenanker der neueren Maschine von Ferranti.

mit dem äusseren Ende der Spule des benachbarten Paares verbunden. Die Befestigung der Spulen und die Isolation derselben von einander und von den zusammenhängenden Metallteilen des Ankers ist mit grösster Sorgfalt durchgeführt.

Jeder Spulenhalter trägt ausserdem einen kleinen Flügel, wodurch eine kräftige Luftbewegung bei der Rotation des Ankers veranlasst wird. Diese Flügel sind in Fig. 91 zu sehen.

In den meisten Maschinen sind die Spulen der einen Ankerhälfte hinter einander und die so entstehenden zwei Gruppen parallel geschaltet.

Der Anker ist ausserordentlich schmal, so dass der Weg, den die magnetischen Kraftlinien in der Luft zu durchlaufen haben, verhältnismässig kurz ist.

Die Erregung der Wickelung der Feldmagnete erfolgt durch den Strom einer kleinen Gleichstrommaschine, die gesondert angetrieben wird.

Der Stromabgeber ist ziemlich verwickelt konstruiert und wird, um eine Berührung desselben unmöglich zu machen, in einem Glaskasten untergebracht, der sich an der einen Seite der Maschine

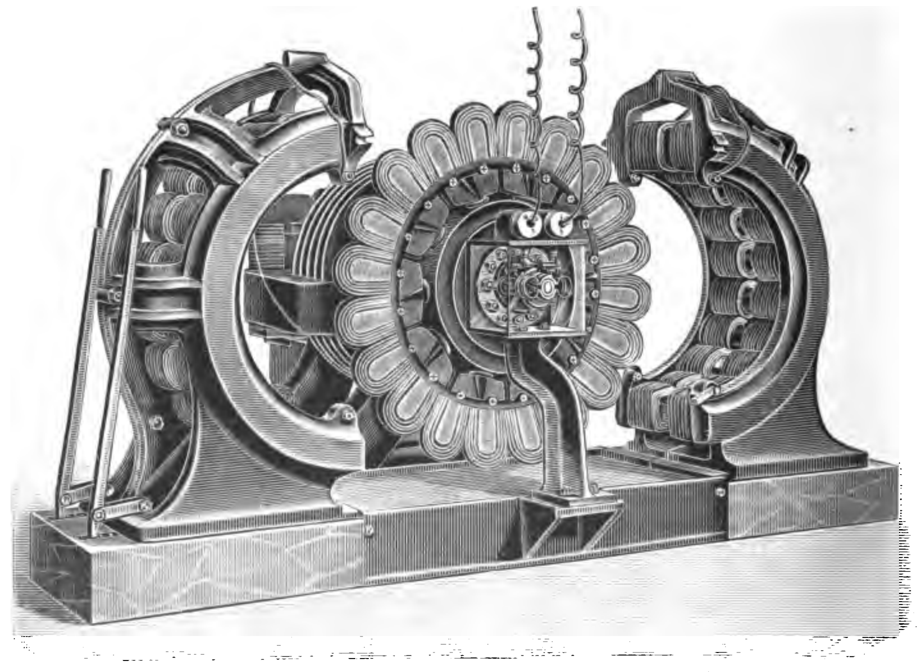


Fig. 91. Neuere Wechselstrommaschine von Ferranti.

befindet.[1]) Besondere Vorsicht war in dieser Hinsicht nötig, da z. B. die Maschinen, die in Grössen bis zu 10000 Pferdestärken für den Betrieb der Deptforder Centralstation nach diesem System gebaut worden sind, eine Klemmenspannung von 10000 V. besitzen.

Jede Maschine hat 48 Spulen und ebensoviele beiderseitig gegenüber stehende Feldmagnete. Sowohl die gegenüber stehenden, als die benachbarten Feldmagnete haben ungleiche Polarität. Die

[1]) Näheres findet man z. B. bei Silv. Thompson, Die dynamoelektrischen Maschinen, deutsch von Grahwinkel, Bd. II, S. 594.

Kerne der Feldmagnete sind auf zwei vertikal geteilten und durch Schrauben zusammengehaltenen gusseisernen Ringen angeordnet. Die Hälften jedes Ringes können auf Schlitten zur Seite gerückt werden, wenn es nötig ist, den Anker für Ausbesserungsarbeiten freizulegen. Fig. 91 zeigt Anker und Feldmagneten, nachdem die Feldmagnetgruppen beiderseitig ausgeschoben worden sind.

Wie wir schon früher (vergl. Kap. IV, 6., S. 81) erwähnt haben, zeigt

10. die Wechselstrommaschine von Mordey,

die auch einen Scheibenanker hat, mehrere besondere Eigentümlichkeiten. Der Anker steht fest, die Feldmagnete rotieren. Alle Magnete auf der einen Seite des Ankers haben gleiche, die auf verschiedenen Seiten des Ankers sich gegenüber stehenden Pole entgegengesetzte Polarität. Auf diese Weise ist es möglich, mit nur einer Erregerspule auszukommen, die entweder sich mit den Elektromagneten dreht oder feststehend angeordnet wird, während der Magnetkern sich in und um die Spule dreht.

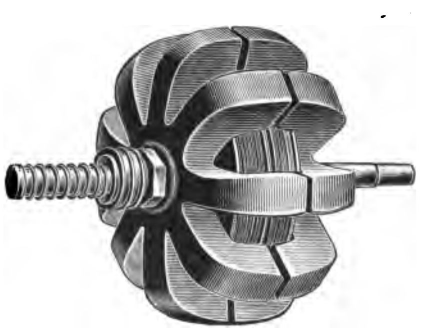


Fig. 92. Rotierende Feldmagnete der Wechselstrommaschine von Mordey.

Auf der Welle sitzt ein massiver eiserner Cylinder, von dem klauenartig geformte Fortsätze B (Fig. 95) ausgehen, die die Erregerspule C umfassen und sich von aussen in der Mitte so weit nähern, dass zwischen ihnen die feststehenden Ankerspulen A gerade noch Platz finden. (Vergl. Fig. 92). Der Anker besteht aus einem aus zwei Teilen zusammengesetzten Ringe. Der zur Befestigung der Spulen dienende massive Teil des Ringes ragt über die Magnetfelder heraus, so dass keine Wirbelströme in dem Metall desselben induziert werden. Die Spulen werden aus dünnem Kupferband mit isolierenden Zwischenlagen auf Kerne aus Porzellan gewickelt. Durch Halter und Schrauben aus Neusilber, das einen hohen Widerstand hat, sind die Spulen mit Futtern aus Hartgummi in dem Ringe befestigt. Die Enden jeder Wickelung sind ausserhalb des Ringes durch Porzellanisolatoren geführt und passend mit einander verbunden. Fig. 93 zeigt die Gestalt einer einzelnen Spule. Damit nicht hohe Spannungsunterschiede zwischen benachbarten Windungen zweier verschiedener Spulen auftreten, sind die geradzahligen und die ungeradzahligen Spulen hinter

einander und beide Gruppen parallel geschaltet. Fig. 94 giebt ein Bild von dem fertigen Anker. Die Zwischenräume zwischen den Polen, in welchen keine Kraftlinien verlaufen, sind ebenso gross wie die Polflächen; die Spulen, deren doppelt so viel vorhanden sind als es Magnetfelder giebt, sind wenig kleiner als die Feldbreite.

Die Eisenmassen der rotierenden Feldmagnete wirken wie ein kräftiges Schwungrad und können unbedenklich mit grosser Umlaufszahl rotieren.

Infolge der zweckmässigen Anordnung der Feldmagnete ist der Energieverbrauch für die Erregung sehr gering, er beträgt meist nur 1,5 % der Leistung der Maschine; eine kleine Gleichstrommaschine mit Nebenschlusswickelung kann daher den Erregerstrom liefern. Der Strom wird der Magnetwickelung der Feldmagnete von zwei auf der Achse befestigten Ringen aus zugeführt. Diese Ringe sind durch biegsames Band aus Kupferdraht, das durch ein Gewicht gespannt wird, mit den Klemmen der Erregermaschine verbunden, wenn nicht, wie in Fig. 95, der



Fig. 93.
Einzelne Spule der Mordeymaschine.



Fig. 94.
Anker der Mordeymaschine.

Anker der Gleichstrommaschine E mit auf der Welle montiert ist. Die Maschinen dieser Art haben den grossen Vorteil, dass sie, weil Hysteresisverluste in dem eisenfreien Anker nicht auftreten, auch bei geringer Belastung noch einen guten Wirkungsgrad haben. Der Ankerwiderstand ist mässig; bei einer Maschine für 2000 Volt und 37,5 Ampère Stromstärke, deren Feldmagnete in der Minute 500 Umläufe machen, beträgt er z. B. nur 1,22 Ohm. Auch die Selbstinduktion ist gering. Maschinen dieser Art werden daher besonders mit Vorteil in Wechselstromcentralen verwendet. Für eine kleinere Maschine dieser Art zeigt das Diagramm, Fig. 96, in welcher Weise die Klemmenspannung abnimmt, wenn der Anker Ströme verschiedener Stärke liefert.

D. Wechselstrommaschinen mit Polankern.

Einen Übergang zu dieser Gruppe bildet eigentlich schon die von Stanley jun. konstruierte Maschine der Westinghouse Co.; da jedoch die Spulen dieser Maschine keine Eisenkerne und in radialer Richtung geringe Tiefe haben, so kann man diese Konstruktion auch zu den Trommelmaschinen rechnen. Eine besonders charakteristische und viel verbreitete Form der Maschinen mit Polankern ist

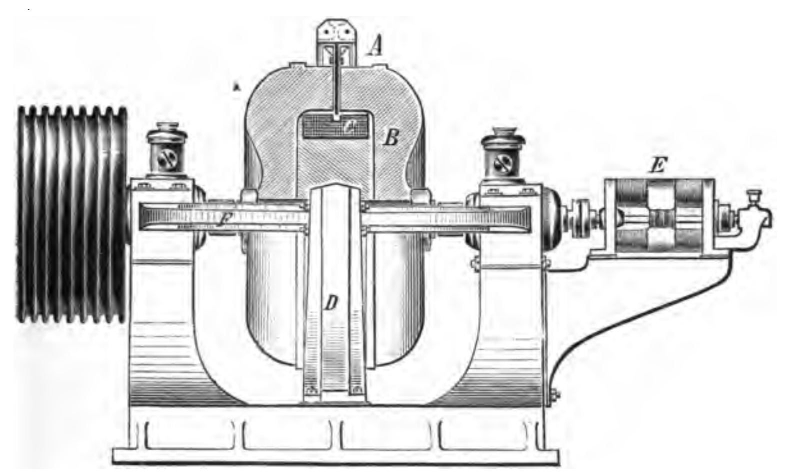


Fig. 95. Wechselstrommaschine von Mordey.

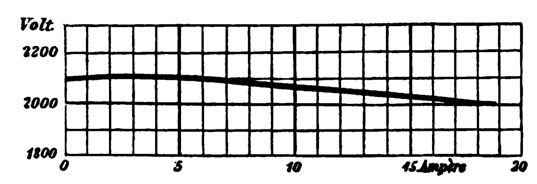


Fig. 96. Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Ankerstromstärke bei einer Mordey-Maschine.

11. die Wechselstrommaschine von Ganz & Co.

Diese Maschinen haben einen feststehenden Anker von der Form eines Hohlcylinders, innerhalb dessen sich die Feldmagnete drehen. Die umstehende Fig. 97 a und b erläutert die prinzipielle Anordnung des Ankers und der Feldmagnete.

Die Kerne K der Feldmagnete werden aus dünnen eisern und Blättern zusammengesetzt, die durch aufgeklebtes Papier von ei en auf isoliert sind. Jedes solches ausgestanzte Blatt K hat m Augen-

eines **U**, und diese Blätter werden derart neben einander gelegt, dass sie einen Stern bilden; auf die untere Schicht legt man eine zweite

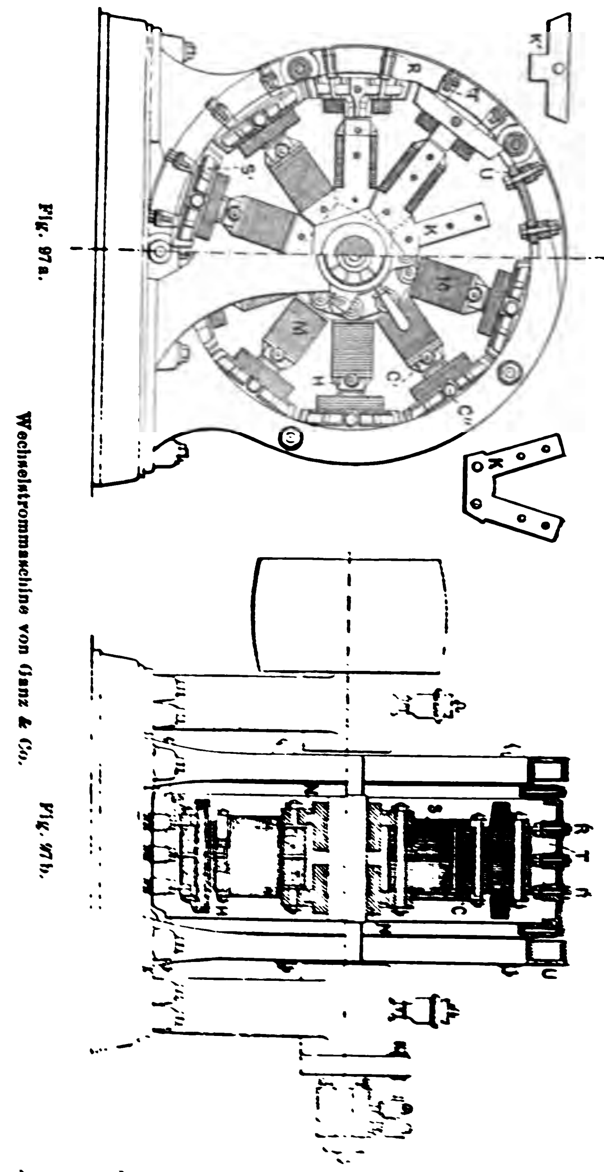


Fig. 97a. Wechselstrommaschine von Ganz & Co. Fig. 97b.

die ...
dener Staderart, dass die Fugen der einen Schicht von den Jochen ... der nächsten Schicht bedeckt werden. Man legt so viele

solcher sternförmigen Schichten übereinander, bis die gewünschte Dicke der Kerne erreicht wird.

Durch Nieten und Schrauben, deren Metall von den Blättern isoliert ist, werden die Blätter zusammengepresst und mit einer auf der Maschinenwelle aufgekeilten Nabe N verbunden.

Die Spulen M der Feldmagnete werden vorher gewickelt und auf die fertigen Kerne K aufgeschoben; durch Schraubbolzen H, die durch den vorstehenden Kern hindurch gehen, werden sie vor dem Abschleudern durch die Centrifugalkraft geschützt.

Die Kerne K′ der Ankerspulen bestehen aus dünnen T förmigen Eisenblättern, die durch Neusilberplatten zusammengepresst werden. Diese Kerne sind unter Verwendung isolierender Zwischenlagen durch Schrauben C″ an den Querstücken befestigt, die das Vorder- und Rückschild der Maschine verbinden. Über den nach innen gerichteten Teil des Kernes wird die Ankerspule geschoben und in dieser Lage durch aufgeschraubte Arme festgehalten.

Jede Ankerspule mit ihrem Kern kann leicht entfernt und ausgebessert werden; durch die so im Anker entstehende Öffnung sind dann auch die Spulen der Feldmagnete zugänglich und können von den Kernen abgezogen werden. Auf der rechten Seite der Maschine in Fig. 97b ist auch der Kommutator abgebildet, der dazu dient, einen Teil des im Induktor erzeugten Wechselstromes in intermittierenden Gleichstrom zu verwandeln. Dieser Gleichstrom wird dann zur Erregung der Feldmagnete verwendet.

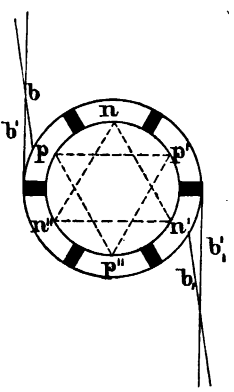


Fig. 98. Gleichrichter der selbsterregenden Maschine von Ganz & Co.

Die Fig. 98 zeigt die Einrichtung dieses Gleichrichters für eine sechspolige Maschine. Der Stromkreis der Feldmagnete steht mit dem einen Ende seiner Wickelung in leitender Verbindung mit den drei Kommutatorsegmenten p, p′, p″; das andere Ende ist mit den ...ten n, n′, n″ verbunden. Die beiden Bürstenpaare bb′ und ...den einen Nebenschluss zu dem im Anker oder in einer ...zeugten Strome. Wenn die Spannung hoch ist, führt ...l dieses Stromes in die primäre Wickelung eines klei- ...iators und leitet den in der sekundären Wickelung in- ...om von niedriger Spannung dann an die soeben er- ...h... ...rstenpaare.

Die ... ns Streifen, aus denen der Gleichrichter besteht, sind durch isolierte Metallstreifen getrennt. Die Bürsten werden auf dem Kommutator so eingestellt, dass die Stromumkehr in dem Augen-

blicke erfolgt, in dem der im Anker erzeugte Wechselstrom durch Null hindurchgeht. Die Spulen der Feldmagneten werden dann von gleichgerichteten Strömen durchflossen. — Die doppelten Bürsten auf jeder Seite haben den Zweck, unmittelbar vor dem Umkehren des Stromes die Erregerspulen für eine sehr kleine Zeit kurz zu schliessen. Der Extrastrom, der dadurch in den Erregerspulen induziert wird, verlängert den verschwindenden Strom und mildert die Schwankungen des gleichgerichteten Stromes.

Mit Hilfe einer Handhabe verstellt man die Bürsten des Gleichrichters so lange, bis die Funkenbildung an der Auflagerungsstelle der Bürsten ein Minimum wird.

Man darf natürlich nicht vergessen, dass gleichgerichteter Wechselstrom kein Gleichstrom ist, dass also die Feldstärke der Magnete Schwankungen unterworfen ist, die Veranlassung sind, dass die Form der im Anker induzierten EMK nicht unerheblich von der Gestalt einer Sinoide abweicht.

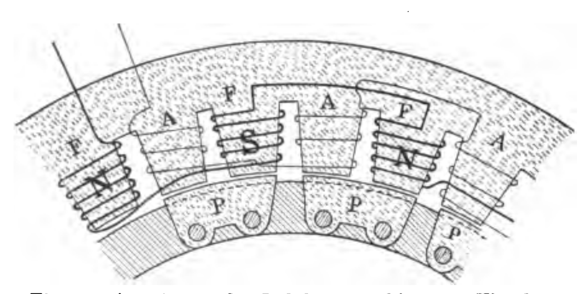


Fig. 99. Anordnung der Induktormaschine von Kingdon.

Für grössere Wechselstrommaschinen, wie solche besonders in Centralstationen Verwendung finden, benutzen auch Ganz & Co. in Budapest und ebenso Helios in Köln-Ehrenfeld ausschliesslich die Fremderregung, weil die Spannung selbsterregender Maschinen sehr empfindlich gegen Veränderungen der Impedanz des äusseren Stromkreises oder der Umlaufsgeschwindigkeit ist. Die Anordnung der Spulen auf dem feststehenden Anker ist bei diesen grossen Maschinen nahezu dieselbe, wie bei den hier beschriebenen. Die Feldmagnete jedoch sind auf dem Kranze eines gewaltigen Schwungrades angeordnet.[1])

E. Induktormaschinen.

Mit dem Namen Induktormaschinen bezeichnet man diejenigen zur Erzeugung von Wechselströmen aus mechanischer Arbeit be-

[1]) Bei einer grossen Maschine dieser Art, die bei 125 Umläufen 42 Wechsel, 2000 Volt und 250 Ampère liefert, befinden sich auf dem Anker 2 × 20 Spulen, deren jede aus 25 Windungen eines Drahtes von 8 mm (9,2 besp.) besteht. Die 40 Feldmagnete haben Spulen von je 212 Windungen aus 6 mm (7,2 besp.) Draht. Der Erregerstrom in jeder Spule beträgt 40 Ampère.

stimmten Vorrichtungen, bei denen durch Änderung des Weges der Kraftlinien Änderungen der die Ankerspulen durchfliessenden Anzahl von Kraftlinien hervorgebracht werden. Zumeist werden solche Maschinen derart hergestellt, dass sowohl der Anker als auch die Feldmagnete stillstehen, und nur ein rotierendes Eisenstück den Kraftlinien verschiedene Wege anweist.

Die erste derartige Maschine ist schon 1883 von Klimenko und eine wesentlich verbesserte 1887 von Mordey hergestellt worden. Letzterem wurde daher erst neuerdings in England auch das ausschliessliche Patentrecht auf das Prinzip dieser Konstruktion zuerkannt.

Eine besonders einfache, wenn auch nicht übermässig zweckmässige Konstruktion dieser Art hat

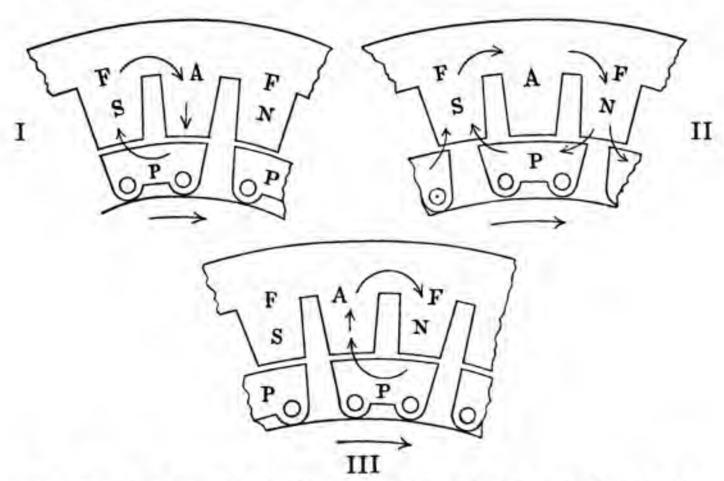


Fig. 100. Der Wechsel der Kraftlinienrichtung in den Ankerkernen AA der Kingdonmaschine.

12. die Wechselstrommaschine von Kingdon.

Aus auf einander gelegten dünnen Eisenblechen ist ein feststehender Ring mit nach innen gekehrten Zähnen hergestellt. (Vergl. Fig. 99.) Die ungeradzahligen Zähne A, A, A . . . tragen die hinter einander geschalteten Ankerspulen, die geradzahligen Zähne F, F, F bilden die Pole der Feldmagnete von abwechselnd entgegengesetzter Richtung der Kraftlinien.

Innerhalb dieses Ringes dreht sich ein Cylinder aus nichtmagnetischem Materiale, der auf seinem äusseren Umfange eigentümlich geformte, aus isolierten Blechscheiben hergestellte Eisenkörper PP trägt.

In der Stellung I (Fig. 100) z. B. verlaufen die Kraftlinien im Eisenkern der Ankerspule A in der durch die Pfeile angedeuteten Richtung. Bei weiterer Drehung (Stellung II) gelangt das Eisenstück P in eine Lage, in der die Kraftlinien der Pole N und S sich durch P schliessen, ohne durch den Kern A der Ankerspule hindurch zu gehen. Rückt der die Eisenkerne tragende Cylinder noch weiter, so verlaufen nunmehr (Stellung III) die Kraftlinien in der entgegengesetzten Richtung durch A, wie sie dies in der Stellung I thaten.

Durch diesen Wechsel in der Richtung und der Anzahl der den Kern A der Spule durchdringenden Kraftlinien wird in den Windungen der Spule ein Wechselstrom induziert.

Erhebliche Verluste durch Hysteresis sind bei diesen Konstruktionen auch nicht durch die Verwendung geblätterter Magnete zu vermeiden.

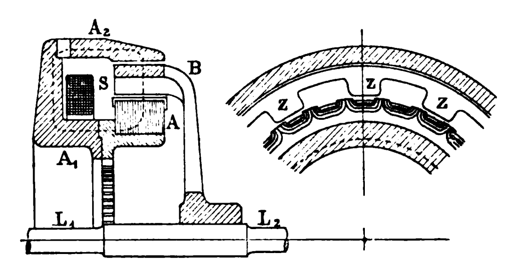


Fig. 101. Ältere Induktormaschine der Compagnie de l'Industrie électrique (System Thury).

Als ein grosser Vorzug dieser Anordnung muss es jedoch angesehen werden, dass keine stromführenden Drähte, sondern nur Eisenmassen P P rotieren.

13. Allgemeines über die eigentlichen Induktormaschinen.

Während die Kingdonmaschine (1890) noch als ein Vorläufer der eigentlichen Induktormaschinen angesehen werden muss, haben wenig später die Konstrukteure der Compagnie de l'Industrie électrique (Systeme Thury) in Genf eine durchaus brauchbare und zweckmässige Form geschaffen. Die Anordnung wird durch nebenstehende Fig. 101 erläutert.

Auf der Welle $L_1 L_2$ ist ein glockenartig geformtes massives Eisenstück festgekeilt, dessen nach der Achse zu gewendete Innenseite gezahnt ist. Dieser Eisenkörper dreht sich in einem feststehenden Stahlringe, der einen Querschnitt hat, der einem C ähnelt. Durch eine grosse, feststehende Spule S, die sich innerhalb dieses Ringes

befindet, wird die linke Seite des Ringes z. B. nordmagnetisch, die rechte Seite südmagnetisch. Die Kraftlinien verlaufen dann von A über A_1 und A_2, überschreiten den äusserst schmalen Luftraum zwischen den glatten Cylinderflächen A_2 und B, werden verteilt durch die Zähne ZZ, die sich an B befinden, und treten in die Oberfläche des eigentlichen Ankers A ein. Die Oberfläche des Ankers besteht aus geblättertem Eisen, und auf derselben befinden sich die eigentlichen Ankerspulen, deren doppelt so viele vorhanden sind, als es Zähne an B giebt.

Wenn nun ein Zahn vor einer Ankerspule A steht, gehen Kraftlinien durch die Spule hindurch, wenn der Zahn weiter rückt, vermindert sich die Zahl der Linien, und wird nahezu gleich Null, wenn eine Lücke sich vor der Spule befindet. In der Spule wird durch diese Änderung der Kraftlinienzahl ein Wechselstrom induziert.

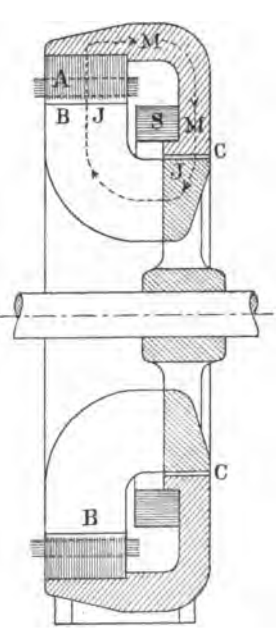


Fig. 102. Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Da Wechselströme in massivem Eisen nur in geringer Menge induziert werden, wenn eine gezahnte magnetische Fläche an einer glatten Eisenfläche hingleitet, und Änderungen der Kraftlinienzahl nur in dem geblätterten Teile A des Ankerringes stattfinden, sind die Verluste durch Foucaultströme und durch Hysteresis nur sehr gering. Da der Kraftlinienweg sehr kurz und die Luftzwischenräume bei B und A sehr klein sein können, bei B ausserdem die Kraftliniendichte gering ist, fällt der Energieaufwand für Magnetisierung nur sehr gering aus (1 % bis $^1/_3$ % der Leistung der Maschine).

Infolge der grossen Kraftlinienzahl, die durch jeden Zahn hindurch geht, können die Spulen aus wenig Windungen bestehen, dadurch wird der innere Widerstand des Ankers gering. Die Selbstinduktion wird gering sein wegen der niedrigen Windungszahl und wegen der Anordnung der Spulen auf der Ankeroberfläche. Kräftiges Feld, geringer innerer Widerstand, niedrige Selbstinduktion sind die Bedingungen, welche solche Maschinen sowohl zur Parallelschaltung, als besonders auch zum Motorbetriebe geeignet erscheinen lassen. Der Unterschied in der Stärke des Erregerstromes zwischen Leerlauf und Vollbelastung kann auf 5 % und noch weniger herabgebracht werden.

Eine etwas abgeänderte Form ist im Jahre 1894 von den In-

genieuren der Maschinenfabrik Oerlikon (den Herren E. Arnold und E. Kolben) vorgeschlagen und zur Ausführung gebracht worden.

Die Erregerspule S, deren (schraffiert gezeichneter) Querschnitt in der Fig. 102 zu sehen ist, liegt in dem feststehenden Ankerringe. Die Ebene der Windungen dieser Spule steht senkrecht zur Achse. Auf der Achse ist der rotierende Eisenkörper JJ befestigt, der bei B gezahnt ist. Die Spulen sind in Nuten mit übergreifenden Zähnen des aus geblättertem Eisen hergestellten hohlcylinderischen Ankers A eingebettet. Der Verlauf der Kraftlinien ist in der oberen Hälfte des Querschnittes mit gestrichelten Linien eingezeichnet. Zwischen A und B und dann bei C haben die Kraftlinien Lufträume zu überschreiten. Beide Zwischenräume können aber sehr eng gewählt werden, und bei C, wo sich zwei glatte Eisenflächen gegenüber stehen, ist ausserdem die Kraftliniendichte gering.

Es giebt doppelt so viel Spulen im Anker A, als Zacken bei B vorhanden sind. Die Spulen werden über Schablonen fertig gewickelt, in die halboffenen Nuten des Ankereisens eingelegt und dort gut isoliert und befestigt. Der Ring, der die Ankerspulen trägt, kann in mehrere Segmente zerlegt werden, die durch Verschraubungen zusammen gehalten werden.

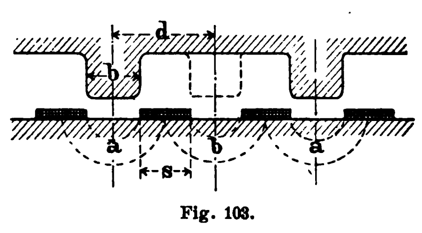


Fig. 103.

Es hat sich in der Praxis als vorteilhaft herausgestellt, auch bei B die Oberfläche der Zähne des rotierenden Eisenstückes J J aus geblättertem Eisen herzustellen, da sonst diese Vorsprünge durch Wirbelströme stark erwärmt werden.

E. Arnold[1]) hat gezeigt, dass für einphasigen Wechselstrom die in Fig. 103 gewählte Anordnung der Spulen und Zacken des Eisenkörpers die zweckmässigste ist. Es ist in diesem Falle:[2])

$$\frac{b}{d} = 0{,}5 \qquad \frac{s}{d} = 0{,}5$$

und der Koëffizient K hat demnach für jeden der beiden, in den Spulengruppen 1 und 2 induzierten Wechselströme nach Kapp den Wert K = 2,31. Diese beiden Wechselströme sind aber gegen einander um 90° in der Phase verschoben und in jeder Phase kommt nur die Hälfte der wirksamen Drähte zur Wirkung. Durch Hinterein-

---

[1]) E.-T. Z., Bd. XVI 1895, S. 140.

[2]) Da Pole gleichen Vorzeichens sich folgen, wie bei der Mordeymaschine (S. 80 u. S. 133), so ist für d der halbe Abstand zweier Pole einzusetzen.

anderschaltung beider Spulengruppen entsteht somit ein einphasiger Wechselstrom, dessen EMK

$$E = \frac{e \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{e}{\sqrt{2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

ist; wenn e die EMK ist, die erhalten worden wäre, wenn zwischen zwei gleichsinnigen Polen noch ein Pol entgegengesetzten Vorzeichens (in der Figur 103 gestrichelt gezeichnet) vorhanden gewesen wäre, und alle Drähte zur Erzeugung eines Stromes gedient hätten. Der Wert K wird daher bei der Induktormaschine

$$K = \frac{2{,}31}{\sqrt{2}} = 1{,}64.$$

Bei gleicher Kraftlinienzahl für jeden Pol wäre somit die EMK einer mehrpoligen einphasigen Wechselstrommaschine mit doppelter Polzahl bei derselben Drahtzahl, Polbreite, Armaturlänge und Umfangsgeschwindigkeit $\sqrt{2}$ mal grösser als die einer Induktormaschine. Man kann aber wegen der Kürze des Kraftlinienweges in der Induktormaschine die Kraftliniendichte grösser wählen, auch die Pole etwas breiter machen und dadurch die Kraftlinienzahl erhöhen, und endlich kann man unbedenklich einem massiven Eisenkörper grössere Umlaufsgeschwindigkeit geben, als einem mit Spulen besetzten Sterne von Elektromagneten.

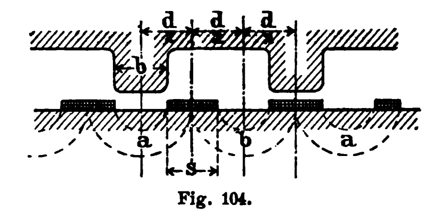


Fig. 104.

Bei Mehrphasenmaschinen gestaltet sich das Verhältnis günstiger für die Induktormaschinen. Benutzt man die in Fig. 104 gezeichnete Anordnung für eine Zweiphasenmaschine, indem man sowohl die Spulen a, als die Spulengruppe b jede für sich hinter einander schaltet und zu getrennten Klemmen führt, so ist für jeden Stromkreis $K = 2{,}31$. Derselbe Wert von K gilt, wenn (Fig. 104) die Maschine als Dreiphasenmaschine für drei Spulengruppen a, b, c benutzt wird, für die EMK jeder Phase.

Daher kommt es, dass Induktormaschinen für einphasigen Wechselstrom etwas schwerer, für mehrphasigen Strom aber etwas leichter ausfallen, als mehrpolige Wechselstrommaschinen für gleiche Leistung und gleiche Beanspruchung des Materiales.

Der grosse Vorteil der Induktormaschinen aber ist der, dass alle vom Strom durchlaufenen Leiter an diesen Maschinen ruhen und nur ein Eisenkörper rotiert. Der für die Erregung des Feldes erforderliche Aufwand ist sehr gering, sowohl hinsichtlich des Energieverbrauches als hinsichtlich der erforderlichen Kupfermenge. Infolge

des kräftigen Magnetfeldes kann man mit wenigen Ankerwindungen auskommen; dadurch wird die Selbstinduktion und der Spannungsabfall solcher Maschinen gering. Die Hysteresisverluste halten sich ebenfalls in niedrigen Grenzen, da nur in einem kleinen Teile der Eisenmassen der Magnetismus Änderungen erfährt. Der Wirkungsgrad solcher Maschinen ist daher sehr hoch.

Die Einführung der Induktormaschinen, die von der Maschinenfabrik Oerlikon, der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft von Brown & Boveri und mehreren anderen Gesellschaften kräftig in die Hand genommen worden ist, muss daher als ein wertvoller Fortschritt im Baue der Wechselstrommaschinen bezeichnet werden.

Der Umstand, dass derartige Maschinen fast keine Bedienung erfordern, und eigentlich kein Teil an ihnen reparaturbedürftig werden kann, lässt sie auch besonders geeignet erscheinen, als Synchronmotoren verwendet zu werden.

14. Die Induktormaschinen der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft und der Maschinenfabrik Oerlikon.

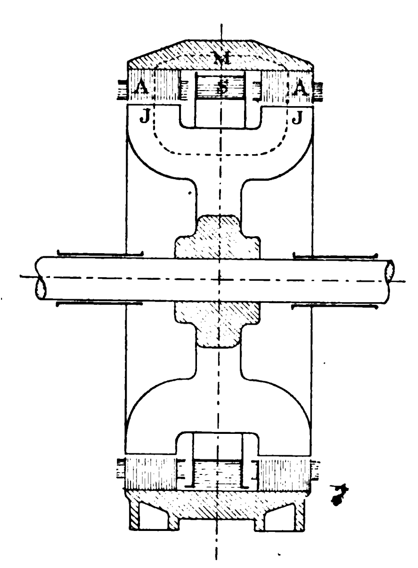


Fig. 105. Neuere Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die neueren Wechselstrommaschinen dieser beiden in einer Art von Kartellverhältnis stehenden Firmen enthalten zwei Kränze von Ankerspulen, die in Nuten mit stark übergreifenden Zähnen eines hohlcylindrischen, aus Eisenblechen hergestellten Ankerkörpers A A eingefügt sind. Dieser geblätterte Eisenkörper ist in einem ruhenden ringförmigen Mantel M (vergl. Fig. 105) aus weichem Stahl befestigt. Die am Mantel M befestigte kreisförmige Spule S dient zur Erregung des Magnetfeldes. Innerhalb des Ankers rotiert ein auf der Drehachse festgekeilter Eisenkörper J, der ähnlich wie ein Zahnrad geformt ist (vergl. Fig. 106). Die dem Anker zugewendeten Polflächen sind, um die Bildung von Wirbelströmen auszuschliessen, aus geblättertem Eisen hergestellt.

Die punktierte Linie in dem oberen Teile der Fig. 105 lässt den Weg, den die Kraftlinien nehmen, erkennen. Mit den Polhörnern rotieren die an deren Oberfläche gehefteten Kraftlinienfelder und diese rufen, während sie an der Oberfläche der Spulen vorüberschreiten, in den Windungen Induktionsströme hervor.

Der zur Felderregung erforderliche Gleichstrom wird durch eine kleine Gleichstrommaschine G geliefert, deren Anker an der Maschinenwelle befestigt ist (vergl. Fig. 111a und b).

Die Abbildungen Fig. 107 und Fig. 108 zeigen die äusseren Erscheinungen dieser Maschinen, einer kleineren und einer grösseren, in den thatsächlich ausgeführten Formen, wie sie zur Zeit von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut werden. Die nachfolgenden Fig. 109 und 110 stellen die drehenden Eisenkörper gesondert dar, nachdem sie aus den Maschinen herausgenommen worden sind.

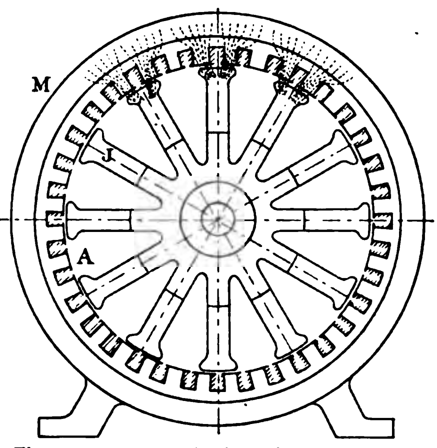


Fig. 106. Vordere Ansicht einer Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Verhältnisse der Abmessungen der kleineren der beiden dargestellten Maschinen sind an den beigefügten Durchschnitten Fig. 111a und b zu ersehen.

An den Maschinen kann es auffallen, dass keine Klemmen zur Abführung des Stromes zu sehen sind. Diese Klemmen sind nämlich am unteren Teile des Maschinengestelles angebracht, um jede Berührung durch Unbefugte unmöglich zu machen. — Die Gehäuse der Maschinen sind zweiteilig; durch Abheben der oberen Hälfte sind alle im Innern gelegenen Teile leicht zugänglich.

Die Wellen sind aus Stahl hergestellt, die Zapfen gehärtet; die Lager besitzen selbstthätige Ringschmierung. Es giebt also an diesen Maschinen eigentlich keine Teile, die eine Bedienung erforderten oder eine Abnutzung erleiden könnten.

Derartige Maschinen werden in verschiedenen Grössen gebaut für Spannungen von 200 bis 10 000 Volt.

Die in Fig. 107 und Fig. 111 abgebildete 100pferdige Wechselstrommaschine giebt 3900 Volt und bei 500 Umläufen in der Minute 50 Wechsel. Der Anker hat einen inneren Durchmesser von 830 *mm*

und trägt 24 Doppelspulen; jede Spule besteht aus 38 Windungen eines Drahtes von 3 *mm* Dicke (3,6 besp.).

Die Feldspule hat 546 Windungen eines Drahtes von 4,5 *mm* Durchmesser (4,9 besp.). Bei Vollbelastung ist ein Erregerstrom von 10,5 Ampère Stärke bei 90 Volt Klemmenspannung erforderlich.

Für die grössere in Fig. 108 abgebildete Maschine teilen wir auf S. 159 die Wickelungsverhältnisse für den Fall mit, dass die Maschine zur Erzeugung von Drehstrom verwendet wird.

Wenn besonders niedrige Umlaufszahlen erwünscht sind, giebt die

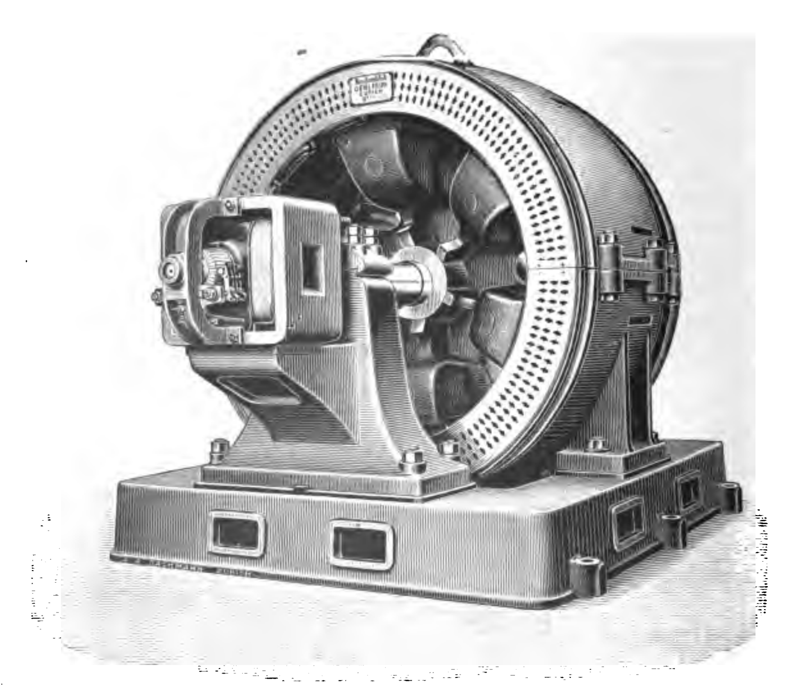


Fig. 107. Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft dem Anker einen grösseren Durchmesser und eine geringere Breite und lässt zwischen zwei über einander stehenden Ankeroberflächen AA einen von der Seite her eingreifenden Kranz von Polstücken P umlaufen (vergl. Fig. 113), die unmittelbar an dem Schwungrade der Dampfmaschine befestigt sind. Die Spulen AA sind wiederum in die Oberfläche zweier Ankereisen versenkt, die aus einzelnen von einander isolierten Blechstücken hergestellt sind; diese beiden Ankereisen werden von einem aus Stahlguss hergestellten, ruhenden, massiven Körper MM getragen.

Der mittlere Weg der durch die Erregerspule S erzeugten Kraftlinien ist durch die punktierte Linie in dem oberen Teile der Figur angedeutet.

Die Figur 113 zeigt einen Durchschnitt durch dieselbe Maschine, aus dem man die Gestalt und Grösse der Polstücke PP ersehen kann.

Infolge der Drehung der Polstücke P wandern die Kraftlinien-

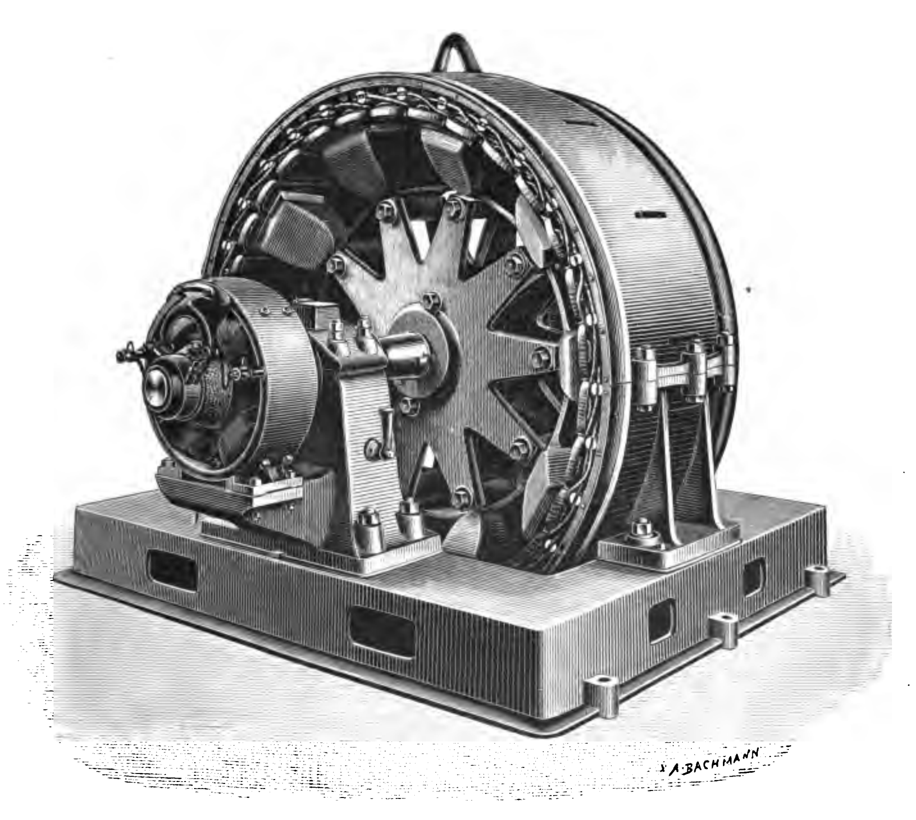


Fig. 108. Grössere Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

felder längs der Ankeroberfläche hin und induzieren in den Spulenwindungen Wechselströme.

Grosse Maschinen mit dieser Anordnung der Spulen und rotierenden Polstücken haben sich z. B. in dem städtischen Elektrizitätswerk in Strassburg i. E. sehr gut bewährt.

Eine grössere derartige Maschine der A. E. G., die allerdings zur Erzeugung von dreiphasigem Wechselstrom bestimmt ist, macht 167 Umläufe in der Minute und liefert 50 volle Perioden in einer



Fig. 109. Der rotierende Eisenkörper der kleineren Induktormaschine.



Fig. 110. Rotierender Eisenkörper der grösseren Induktormaschine.

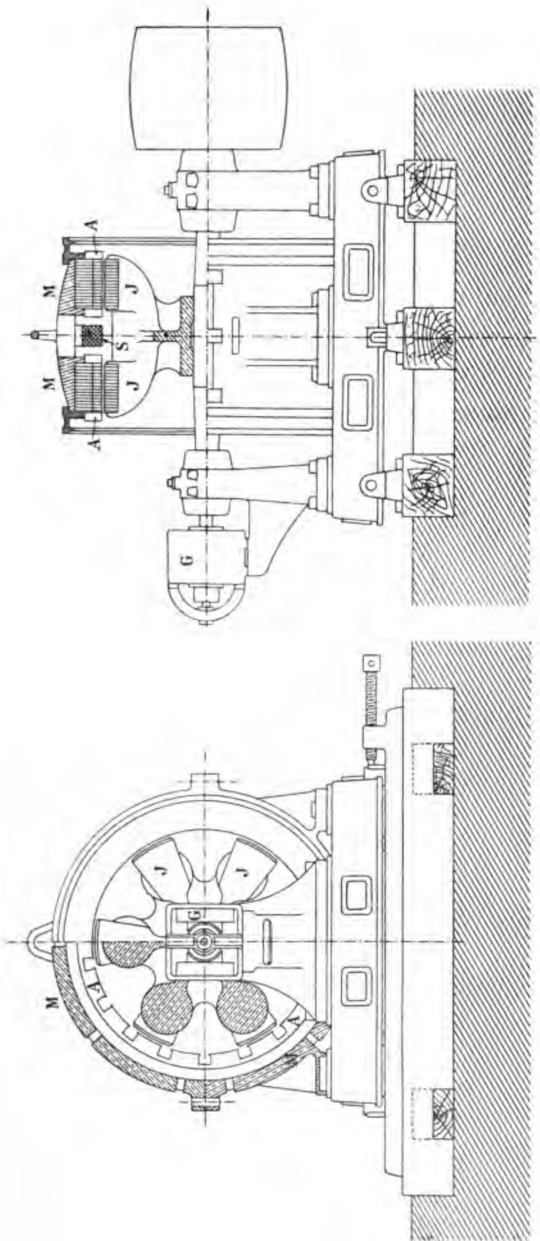


Fig. 111 a.

Fig. 111 b.

Durchschnitt durch die kleinere Induktormaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Sekunde. Jeder Ankerring hat 54 Spulen und dementsprechend giebt es (vergl. S. 108, Fig. 72) 18 Polstücke P, P, . . . Wenn, wie im vorliegenden Falle, die Spannung in jeder Stromphase 2900 Volt, die verkettete Spannung der drei Phasen 5000 Volt und die Stromstärke in jedem der drei Stromkreise 28 Ampère betragen soll, besteht jede Ankerspule aus 24 Windungen eines Drahtes von 3,2 *mm* (besponnen 3,7 *mm*); der Widerstand der je 36 hinter einander geschalteten Ankerspulen beträgt (warm) 2,5 Ohm. Die eine Feldspule S besteht aus 260 Windungen eines Drahtes von 7 *mm* Durchmesser (besponnen 7,5 *mm*) und hat einen Widerstand von

Fig. 112. Induktormaschine der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft für niedrige Umlaufszahlen.

Fig. 113. Durchschnitt durch die Induktormaschine der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

1 Ohm. Als Erregerstrom sind bei Vollbelastung 60 Ampère, bei 65 Volt erforderlich. Der Durchmesser des Ringes M dieser Maschine beträgt 317 *cm*.

15. Induktormaschinen von Brown, Boveri & Co.

Diese Maschine zeigt eine von den vorher beschriebenen Konstruktionen nicht unwesentlich abweichende Einrichtung. Der rotierende Eisenkörper besteht aus zwei um 45^0 gegen einander versetzten vierstrahligen Sternen (vgl. Fig. 114); die Polschuhe auf der

einen Seite entsprechen immer den Zwischenräumen auf der anderen Seite. Der feststehende Anker der Maschine besteht aus zwei Teilen, von denen jeder Teil einer Hälfte des rotierenden Magnetfeldes gegenüber steht. Die Endflächen, die an den beiden Ankerflächen sich vorüber bewegen, sind aus geblättertem Eisen gebildet.

Die Magnetisierung erfolgt durch eine zwischen diesen Sternen befindliche feststehende Spule, die an vier Stellen von aussen ge-

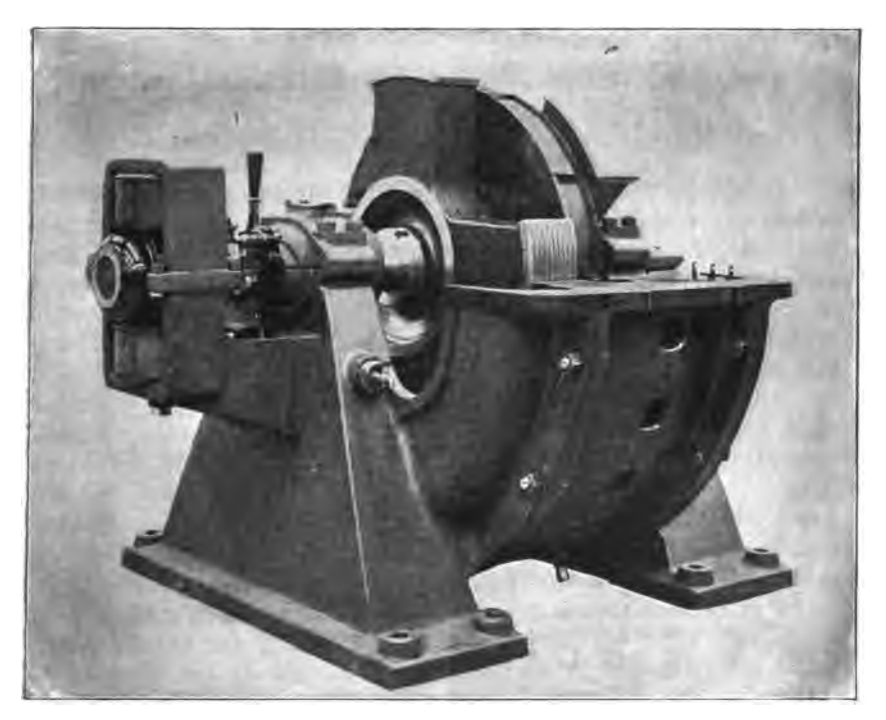


Fig. 114. Wechselstrommaschine der Induktortype von Brown, Boveri & Cie.

halten wird; den zur Erregung erforderlichen Strom liefert eine kleine Gleichstrommaschine, deren Anker mit der Welle der Wechselstrommaschine direkt gekuppelt ist.

Diese Konstruktion wird besonders bei ungewöhnlichen Umlaufszahlen verwendet.

Der Kraftlinienweg im Eisen ist bei dieser Anordnung etwas länger, als bei den früher beschriebenen Induktormaschinen.[1])

[1]) Die Wickelungsverhältnisse und Schaltung teilen wir S. 160 für einen derartigen Stromerzeuger für den Fall mit, dass die Maschine Drehstrom hervorbringt.

6. Kapitel.

Wechselstrommaschinen für Mehrphasenströme.

1. Allgemeines über Mehrphasenmaschinen.

Die Maschinen zur Erzeugung von mehrphasigem Wechselstrom unterscheiden sich im allgemeinen Aufbau nur wenig oder gar nicht von den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen. Der Anker muss nur derart eingerichtet sein, dass er eine Wickelung besitzt, die sich in mehrere Abteilungen gruppieren lässt, die während der vollen Periode eines Wechselstromes zu verschiedenen Zeiten in Thätigkeit treten.

Am leichtesten lässt sich das verstehen, wenn wir die Wickelung einer mehrpoligen Maschine mit Trommelanker betrachten, obgleich man Maschinen für Mehrphasenstrom nach jeder Type, sowohl mit Ring-, Trommel-, Scheibenanker, als auch als Maschinen mit Polanker oder als Induktormaschinen bauen kann. Die nebenstehende Fig. 115 stellt z. B. eine Wellenwickelung für Dreiphasenstrom oder Drehstrom dar. Der Abstand der drei Wickelungen A, B und C von einander beträgt gerade $\frac{1}{3}$ des Polmittenabstandes, B gelangt somit um $\frac{1}{3}$ Welle oder um 120^0 später zum Maximum der Induktion oder in die Lage, in der die Induktion Null ist, als A; die Wickelung C gelangt um denselben Unterschied später in die entsprechenden Lagen als B. Es wird somit in jeder der drei Wickelungen ein Wechselstrom induziert; die drei Wechselströme zeigen jeder gegen den anderen einen Phasenunterschied von 120^0.

In einem Punkte, in der Figur mit J bezeichnet, sind die drei Wellenwickelungen mit einander verbunden; die drei anderen Enden der Wickelung sind zu drei Schleifringen geführt, von denen sie durch drei Schleiffedern abgenommen und durch drei Leitungen an die Verwendungsstelle geführt werden.

Die Summe solcher mehrphasiger Wechselströme von gleicher Stärke ist immer Null, wie die nachfolgende Rechnung zeigt, so dass die Rückleitungen gespart werden können, weil die beiden anderen Leitungsdrähte in jedem Augenblicke zusammen als Rückleitung für

den in der dritten Leitung fliessenden Strom dienen. Ist der in der Leitung A fliessende Strom:

$$J_A = J_0 \cdot \sin \omega t, \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

so ist der in Leitung B gleichzeitig fliessende Strom

$$J_B = J_0 \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

und der in C fliessende:

$$J_C = J_0 \cdot \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad \ldots \ldots \quad 7)$$

Dann ist:

$$J_A + J_B + J_C =$$

$$J_0 \cdot \left[\sin \omega t + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)\right] \quad \ldots \quad 8)$$

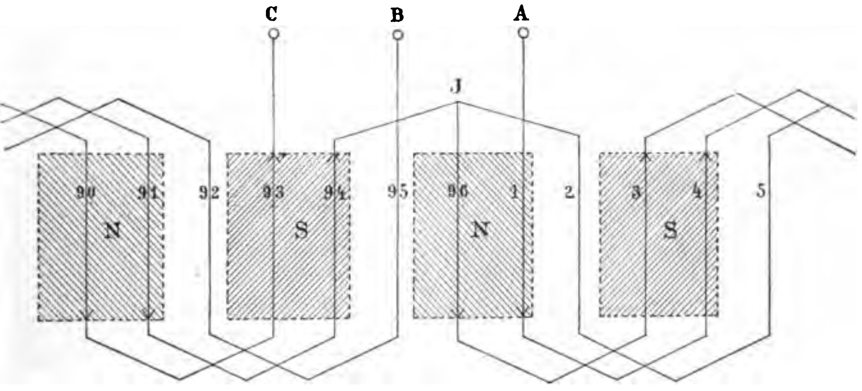


Fig. 115. Wellenwickelung für Dreiphasenstrom.

Entwickelt man die Sinus der Winkelsummen nach den bekannten goniometrischen Formeln, so erhält man:

$$J_A + J_B + J_C = J_0 \cdot \left[\sin \omega t + \sin \omega t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} + \cos \omega t \cdot \sin \frac{2\pi}{3} + \right.$$

$$\left. \sin \omega t \cdot \cos \frac{4\pi}{3} + \cos \omega t \cdot \sin \frac{4\pi}{3}\right]$$

Beachtet man nun, dass:

$$\sin \frac{2\pi}{3} = \sin 120^0 = + \tfrac{1}{2} \sqrt{3} \qquad \cos \frac{2\pi}{3} = \cos 120^0 = - \tfrac{1}{2}$$

$$\sin \frac{4\pi}{3} = \sin 240^0 = - \tfrac{1}{2} \sqrt{3} \qquad \cos \frac{4\pi}{3} = \cos 240^0 = - \tfrac{1}{2}$$

ist, so ergiebt sich:

$$J_A + J_B + J_C =$$

$$J_0 \cdot (\sin \omega t - \tfrac{1}{2} \sin \omega t + \tfrac{1}{2} \sqrt{3} \cos \omega t - \tfrac{1}{2} \sin \omega t - \tfrac{1}{2} \sqrt{3} \cos \omega t) = 0 \quad 9)$$

Die Schaltung der der Induktion unterworfenen drei Gruppen von Leitern in einer Mehrphasen-Wechselstrommaschine, die wir oben durch das Wickelungsschema veranschaulicht haben, ist dadurch charakterisiert, dass je ein Ende eines solchen Leitersystems mit der Aussenleitung, die anderen Enden aber unter sich verbunden sind. Diese Schaltung, die durch Fig. 116 dargestellt wird, heisst *offene Schaltung* oder *Sternschaltung*. Statt Schaltung wird gelegentlich wohl auch der Ausdruck *Verkettung* gebraucht.

Gelegentlich wird aber bei dieser Schaltung auch ein vierter Ausgleichleiter gebraucht, durch den die Vereinigungspunkte zweier mit Sternschaltung versehenen Maschinen oder Transformatoren mit einander verbunden wird. (Vergl. Fig. 117.)

Man kann aber auch das Ende des einen der drei Leitersysteme des Ankers mit dem Anfange des nächsten verbinden und die Leitungen,

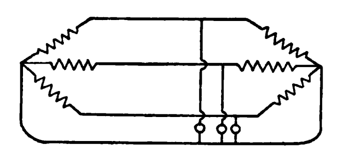


Fig. 117.
Sternschaltung mit einem vierten Ausgleichleiter.

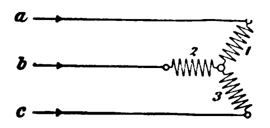


Fig. 116.
Sternschaltung bei Dreiphasenmaschinen.

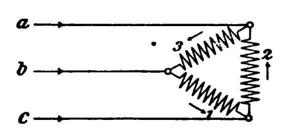


Fig. 118.
Dreieckschaltung bei Dreiphasenmaschinen.

die nach aussen führen, von diesen Verzweigungspunkten ausgehen lassen. (Vergl. Fig. 118.) Dann spricht man von *geschlossener* Schaltung, von *Dreieckschaltung* oder *Ringschaltung*. Einen vierten, neutralen Ausgleichsleiter giebt es bei dieser Art der Verkettung nicht.

Sternschaltung mit neutralem Leiter kommt besonders zur Anwendung, wenn keine Transformation der Ströme stattfindet, also z. B. bei Energieübertragungen mit Dreiphasenströmen auf kürzere Entfernungen. Die Dreieckschaltung wird vorzugsweise benutzt, wenn die Ströme nach ihrer Erzeugung transformiert, dann weithin fortgeleitet, wieder transformiert und nun erst verwendet werden.

Früher wurden vielfach für Zwecke der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie auf weite Entfernungen Wechselstrommaschinen für geringe Spannungen und hohe Stromstärken verwendet;

durch Transformatoren wurden die Ströme derselben in solche von hoher Spannung und geringer Stromstärke verwandelt, hierauf diese hochgespannten Ströme weithin an die Verwendungsstellen fortgeleitet, dort wieder durch Transformatoren in starke Ströme von niederer Spannung umgesetzt und in dieser Form den Lampen und Elektromotoren zugeführt.

Da aber jede Transformation mit einem Verluste an Energie von einigen Prozenten erkauft werden muss, der verschieden grosse Spannungsabfall der Transformatoren bei ungleicher Belastung den

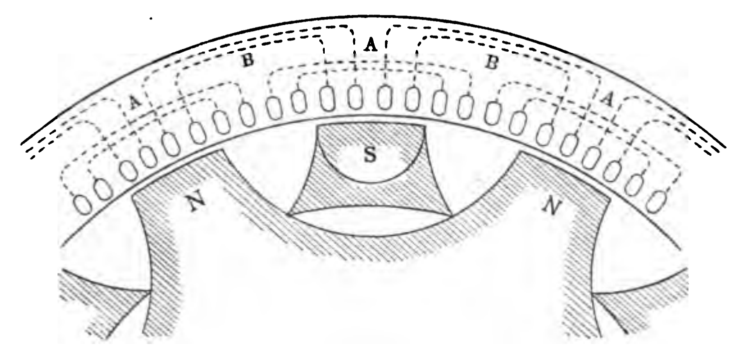


Fig. 119.
Anordnung des Ankers für eine Zweiphasenmaschine der älteren Oerlikontype.

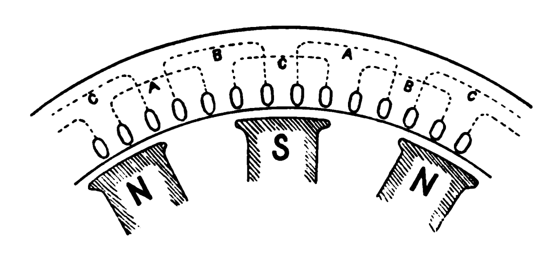


Fig. 120.
Anordnung der Ankerwickelung bei einer Drehstrommaschine.

Betrieb erschwert, und die Preise der Transformatoren ziemlich hoch sind, fängt man jetzt an, dieses System, nach dem z. B. seiner Zeit die denkwürdige Arbeitsübertragung von Lauffen nach Frankfurt a. M. durchgeführt war, mehr und mehr zu verlassen.

Neuere Versuche, zumal solche, die von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin zur Vorbereitung ihrer gewaltigen Kraftübertragungswerke in Rheinfelden gemacht worden sind, haben gezeigt, dass es unter Benutzung der neueren Isolationsmaterialien, zumal des Mikanits, möglich ist, zuverlässig arbeitende

Wechselstrommaschinen zu konstruieren, die direkt hochgespannte Ströme von 10000 Volt und 20000 Volt liefern.[1]) Derartige Spannungen aber genügen für Übertragung elektrischer Energie selbst auf sehr weite Entfernungen bei Benutzung von Leitungen von sehr geringem Querschnitte. Alsdann kann mindestens eine Transformation des Stromes in Wegfall kommen.

Bei Wechselstrommaschinen für Zwei- und Mehrphasenströme kann man den verfügbaren Wickelraum auf dem Anker dadurch günstiger ausnutzen, dass man die einzelnen Spulen, die den verschiedenen Stromkreisen angehören, zum Teil übereinander greifen lässt. Die Verbindungsstücke der Stäbe bei Stabwickelung oder die nicht der Induktion unterworfenen Teile der Bewickelung werden dann in verschiedene Ebenen abgebogen, um Kurzschlüsse zu verhüten. So zeigt z. B. Fig. 119 die Anordnung der Verbindungsstücke (durch gestrichelte Linien angedeutet) auf der einen Seite des Ankereisens bei einer Maschine für Zweiphasenstrom nach der älteren Oerlikontype. Aus Fig. 120 erkennt man die Lage der Verbindungsstücke auf einer Seitenfläche des Ankers bei einer Maschine mit rotierenden Innenpolen für Dreiphasen- oder Drehstrom.

Fig. 121. Seitenansicht der Ankerwickelung einer Drehstrommaschine.

Man sieht, dass die Spulenmitten in diesen Abbildungen um die Hälfte oder ein Drittel der Polbreite gegen einander verschoben sind. (Vergl. auch S. 107.)

Aus der Abbildung, Fig. 121, die ein Stück des Ankers eines Drehstrommotors darstellt, erkennt man, in welcher Weise die

[1]) Der Verfasser hatte Gelegenheit, im Juni 1896 bei der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin eine Wechselstrommaschine zu sehen, die 24000 Volt Klemmenspannung gab.

Verbindungen der einzelnen Elemente der Ankerwickelung in verschiedenen Ebenen an der Vorder- oder Rückfläche des Ankers an einander vorüber geführt werden, ohne dass sich dieselben berühren. Genau dasselbe Verfahren wird auch bei den Stromerzeugern für Dreiphasenstrom verwendet. Die Buchstaben A, B, C beziehen sich auf die drei Leitergruppen, die die drei um je 120° in der Phase gegeneinander verschobenen Ströme J_A, J_B und J_C führen. Gleichzeitig kann diese Ankerwickelung als Beispiel für den Fall dienen, dass nicht alle Löcher des Ankereisens mit Wickelung versehen sind.

Dadurch, dass man die den verschiedenen Stromkreisen zugehörigen Spulen zum Teil über einander wickelt und die Spulen um je halbe oder drittel Polbreite gegen einander verschiebt, kann man jede beliebige Wechselstrommaschine in eine Maschine für Zweiphasenstrom oder Drehstrom verwandeln. Um den erforderlichen Platz zu gewinnen, wenn man die Spulen nur neben einander legen und doch die Mitten um die Hälfte oder ein Drittel der Polbreite gegeneinander versetzen will, lässt man dann an zwei diametral gegenüberstehenden oder an um je 120° von einander abstehenden Stellen je eine Spule weg.[1])

Weniger zweckmässig erscheint die von der Westinghouse Co. (Pitsburg, Amerika) für Zweiphasen-Wechselstrommaschinen gewählte Anordnung, bei der zwei Gruppen von Feldmagneten dicht neben einander gestellt werden, die um den halben Abstand eines Nord- und Südpoles gegeneinander versetzt sind. In diesen beiden Systemen von Feldmagneten bewegen sich in diesem Falle zwei auf derselben Welle befestigte Anker, die zwei um 90° in der Phase verschobene Wechselströme liefern.

2. Die Spannungen und Stromstärken bei verkettetem Dreiphasenstrom.

Wenn Sternschaltung angewendet wird, wie dies Fig. 116 andeutet, herrschen an den Enden der Ankerspulen 1, 2, 3 Wechselspannungen, die gleiche Maximalwerte haben, aber um 120° in der Phase gegen einander verschoben sind. Um den wirksamen Spannungsunterschied zwischen den Anfangspunkten der Leitungen a, b, c zu finden, muss man diese Spannungen nach dem in Kapitel I, Abschnitt 4, S. 8, angegebenen Verfahren zusammensetzen. Man erhält alsdann drei gleichlange Vektoren, die Winkel von 120° mit einander einschliessen. (Vergl. Fig. 122.) Nehmen wir an, der Momentanwert des Spannungsunterschiedes zwischen dem bei a ge-

---

[1]) Vergleiche Silvanus Thompson, Polyphase Electric Currents, S. 35.

legenen Ende der Spule 1 und dem Verkettungspunkte der drei Ankerwickelungen sei $E \cdot \sin \omega t$, so ist gleichzeitig der Spannungsunterschied zwischen den Enden der Spule 2 gleich $E \cdot \sin (\omega t - 120)$ und der resultierende Spannungsunterschied $E' = \sqrt{3} \cdot E \cdot \sin (\omega t + 30)$. Die resultierende effektive Spannung oder verkettete Spannung ist somit $\sqrt{3} = 1,73$ mal grösser als die Phasenspannung, deren Maximalwert E, deren effektiver Mittelwert $\frac{E}{\sqrt{2}}$ ist, und die verkettete Spannung eilt der Phasenspannung um 30^0 voraus.

Das Vektordiagramm Fig. 122 zeigt dies deutlich. b ist rückwärts verlängert als —b, weil wenn die EMK in a nach aussen gerichtet ist, die in b wirksame nach innen gerichtet ist und subtrahiert werden muss.

Nennen wir die Stromstärke in einer Ankerphase J, so ist sie bei Sternschaltung selbstverständlich eben so gross in den anschliessenden Aussenleitern a, b, c.

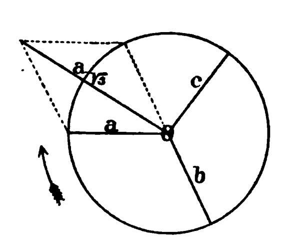


Fig. 122. Vektordiagramm für verkettete Dreiphasenströme.

Wenn dagegen, wie in Fig. 118, die drei Ankerwickelungen 1, 2, 3 in geschlossener oder Ringschaltung verkettet sind, so herrscht zwischen den Enden einer Phasenwickelung, also auch zwischen den Anfängen der Aussenleiter a, b, c die Phasenspannung E. Am Vereinigungspunkte der Phasenwickelungen 1 und 2 aber kommen zwei Ströme zusammen, von denen der eine zum Vereinigungspunkte hin, der andere aber vom Vereinigungspunkte fort fliesst, und bei denen eine Phasendifferenz von 120^0 besteht.

Diese Ströme werden daher ebenfalls nach dem Diagramm Fig. 122 zusammengesetzt, und es ergiebt sich für den in den Aussenleiter eintretenden Strom ein um $\sqrt{3}$ grösserer Wert, als für den die Phasenwickelungen durchfliessenden Strom, ebenso eilt der Leitungsstrom um 30^0 in der Phase voraus.

Bei der Sternschaltung ist somit der Spannungsunterschied der Aussenleiter höher und die Stromstärke gleich der in den Ankerwickelungen; bei der Ringschaltung ist der Spannungsunterschied zwischen den Aussenleitungen gleich der in jeder Ankerphase erzeugten, dagegen ist die verkettete Stromstärke in diesem Falle grösser als die in den Ankerwickelungen fliessende.

Wir wollen zum Schlusse nicht unerwähnt lassen, dass auch gemischte Schaltungen denkbar sind, bei denen ein Teil der Anker-

spulen der drei Phasen in Ringschaltung, die anderen in Sternschaltung verkettet werden.

3. Die Drehstrommaschinen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft,

gehören zu der in Kap. V, Abschn. E., S. 139 u. s. f. besprochenen Gruppe der Induktor-Wechselstrommaschinen, die wir auf S. 144 u. s. f. beschrieben haben.

In dem Raume, der auf der Innenseite des Ankers zwischen benachbarten Polmitten des rotierenden eisernen Kernes liegt, befinden sich immer drei Spulen, die gleich weit von einander abstehen. In der Abbildung 106, S. 145, rotiert z. B. ein 12 strahliger Eisenstern vor 36 Paaren von Ankerspulen. Die 1. Spule ist mit der 4., diese mit der 7. u. s. f., die 2. mit der 5. und 8. u. s. f., die 3. mit der 6. und 9. u. s. f. verbunden.

In jeder dieser Spulengruppen werden Wechselströme induziert; die Ströme der drei Gruppen besitzen Phasendifferenzen von je 120° gegen einander.

Durch eine geringfügige Änderung der Verbindung der Spulen des ruhenden Ankers kann jede solche Maschine statt zur Erzeugung dreiphasigen Wechselstromes auch dazu dienen, einfachen Wechselstrom hervorzubringen.

Der Wirkungsgrad solcher Maschinen ist ein äusserst günstiger, 92 % bei induktionsfreier Belastung; bei Betrieb von Elektromotoren kann wegen der Phasenverschiebung der Wirkungsgrad bis auf 72 % sinken.

Der Abfall der Klemmenspannung beträgt bei Vollbelastung durch Widerstände ohne Selbstinduktion nur etwa 7 % der Spannung bei Leerlauf, wenn die Erregung ungeändert bleibt; bei Belastung mit Transformatoren und Elektromotoren könnte der Spannungsabfall das Vierfache erreichen, wenn man nicht durch Erhöhung der Erregung nachhelfen wollte.

Bei einer Maschine für 280 Kilowatt (ungefähr 400 Pferdestärken) bei 2750 Volt Spannung betrug die Zahl der Umläufe in 1 Minute $u = 150$, die Wechselzahl 40 in der Sekunde, das Kupfergewicht der Erregerspule 700 *kg*, das Kupfergewicht der Spulen der beiden Anker 200 *kg*. Das Gewicht des eisernen Gehäuses betrug 6000 *kg*, das des Eisens der beiden Anker 2000 *kg* und das Gewicht der beweglichen Polstücke 750 *kg*, somit im ganzen 900 *kg* Kupfer und 8750 *kg* Eisen.

4. Wickelungsverhältnisse einiger ausgeführten Dreiphasenmaschinen.

a) Drehstrommaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die in Fig. 107 und Fig. 108 abgebildeten Maschinen werden sowohl als gewöhnliche Wechselstrommaschinen als auch als Maschinen für Drehstrom verwendet und in verschiedenen Grössen für verschiedene Spannungen und Leistungen hergestellt.

Wenn die in Fig. 108 abgebildete Maschine z. B. zur Erzeugung von Drehstrom von 3000 Volt Phasenspannung dient und einer Leistung von 300 Pferdestärken entspricht, liefert sie bei 250 Umläufen in 1 Minute 42 Perioden in 1 Sekunde.

Der ruhende Anker besitzt alsdann 30 Spulen, und zwar 10 in jeder Phase. Jede dieser Spulen besteht aus 36 Windungen eines Drahtes von 3,4 *mm* Durchmesser.

Das Magnetfeld wird durch eine einzige ruhende Spule erzeugt, die aus 360 Windungen eines Drahtes von 5 *mm* Dicke besteht.

b) Drehstrommaschinen von Brown, Boveri & Cie.

Wenn die auf S. 126 in Fig. 86 abgebildete Maschine der oben genannten Firma als Dreiphasenmaschine für 150 Pferdestärken ausgeführt wird, die bei 380 Umläufen 50 Wechsel in der Sekunde, 3300 Volt verkettete Spannung bei Sternschaltung und 18 Ampère Stromstärke in jeder der drei Phasen liefert, beträgt die Anzahl der wirksamen Ankerdrähte jeder Phase 608. Die Ankerwickelung wird aus Draht von 3,2 *mm* Dicke (4 *mm* besp.) hergestellt. Der Eisenquerschnitt des Ankers beträgt 380 *qcm*. Die Spulen der rotierenden Feldmagneten haben 400 Windungen und sind aus 4 *mm* dickem Drahte (besp. 4,5) hergestellt.

Der Widerstand der Bewickelung der Feldmagneten ist 3,8 Ohm.

Bei der in Fig. 114 abgebildeten achtpoligen Induktormaschine von Brown, Boveri & Cie. sind, sofern die Leistung 150 Pferdestärken beträgt, die Verhältnisse die folgenden:

Verkettete Spannung bei Sternschaltung 5300 Volt Stromstärke, in jeder Phase 11 Ampère.

Umlaufszahl 600 in 1 Minute, Zahl der Perioden 50.

Die Anzahl der Drähte ist in jeder Phase 800, der Durchmesser des Ankerdrahtes 2,5 *mm* (3,2 besp.).

Der Querschnitt des Ankereisens beträgt 860 *qcm*.

Die Erregerspule besteht aus Draht von 4,4 *mm* Dicke (4,7 besp.) und hat einen Widerstand von 2,5 Ohm.

c) Drehstrommaschine von Siemens & Halske.

Wenn die in Fig. 84 abgebildete Wechselstrommaschine unter Anwendung der auf S. 108, Fig. 72, beschriebenen Wickelung als Drehstrommaschine für 300 Kilowatt verwendet werden soll, die bei Sternschaltung eine verkettete Spannung von 2000 Volt und eine Stromstärke von 36 Ampère in jeder der drei Phasen liefert, so würden folgende Bewickelungsverhältnisse gewählt werden können:

Jede der 10 Spulen jeder Phase des Ankers enthält 20 Windungen eines Drahtes von 4,5 *mm* (besp. 5,5).

Die Spulen der 20 Feldmagneten (jeder Polschuh bedeckt 2 Nuten) haben je 270 Windungen eines Drahtes von 4,4 *mm* Dicke (5,5 besp.).

Die Erregung der Feldmagneten erfolgt durch einen Strom von 15 Ampère bei 110 Volt.

Die Umlaufszahl ist 300, die Periodenzahl 50.

Der innere Durchmesser des Ankereisens beträgt 1580 *mm*, die Breite 410 *mm*.

5. Die Drehstromgeneratoren der Kraftübertragungswerke in Rheinfelden.

Die gewaltigste Kraft- und Lichtverteilungsanlage in Europa wird z. Z. in Rheinfelden von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin ausgeführt.

Der Entwurf der hierzu erforderlichen gewaltigen Drehstrommaschinen rührt von der Maschinenfabrik Oerlikon her; die Ausführung hat jedoch die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft selbst übernommen.

Wir teilen einige Einzelheiten über diese Drehstromerzeuger mit,[1]) weil die Konstruktion in allen Teilen sehr sorgfältig durchdacht ist und gleichzeitig ein treffliches Beispiel für die Anordnung mit vertikaler Drehachse abgiebt, die wir bisher noch nicht erwähnt haben und die doch, zumal bei direkter Kuppelung mit dem Schaft einer Turbine, sehr zweckmässig ist.

Diese Maschinen haben zwei horizontale, ruhende Ankerringe A_1 und A_2, die durch das aus Stahlguss hergestellte Gehäuse M M mechanisch und magnetisch mit einander verbunden sind. (Vergl. Fig. 123.) Diese Ankerringe bestehen aus einzelnen, von einander isolierten Eisenblechen, in die Nuten zur Aufnahme der Spulen eingestanzt sind. Zwischen beiden Ankerflächen liegt die mit dem ruhenden Gehäuse fest verbundene Magnetspule S.

---

[1]) Nach der wertvollen Schrift: Die Kraftübertragungswerke in Rheinfelden. Herausgegeben von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, 1896.

Auf der Maschinenwelle sitzt ein Eisenkörper, der einem doppelten Zahnrade ähnlich ist. (Vergl. Fig. 110, S. 148.) Die vorspringenden Polschuhe oder Zähne schliessen die Kraftlinien. Bei der Drehung dieses Polrades wandern die Stellen grösster Dichte der Kraftlinien an der Oberfläche beider Anker entlang. Wenn vor einem Spulenpaar ein Polschuhpaar steht, ist die Kraftliniendichte am grössten; wenn Lücken des Zahnrades vor den Spulen stehen, gehen so gut wie keine Kraftlinien durch die Spulen hindurch. Durch diesen Wechsel der Kraftlinienzahl in den Spulen werden in deren Windungen Wechselströme induziert.

Die Versetzung der Spulen in Bezug auf die Pole veranlasst die Entstehung von Mehrphasenstrom.

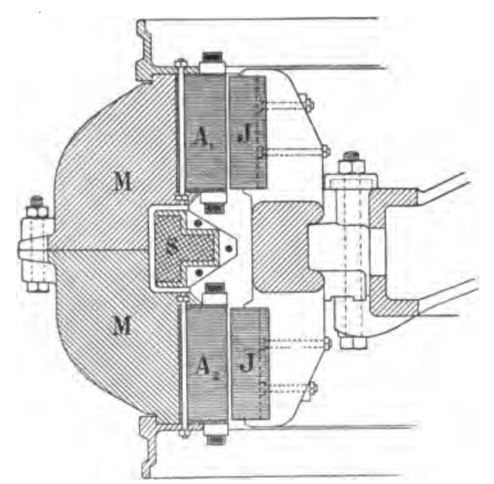


Fig. 123. Durchschnitt durch die Drehstrommaschine der Kraftübertragung in Rheinfelden.

Bei der Anlage in Rheinfelden stehen die Drehstrommaschinen unmittelbar über den Wasserkästen der Turbinen.

Das gusseiserne Gehäuse, das das rotierende Induktorrad ringförmig umgiebt und die beiden Ankerkränze enthält, besteht aus vier Bogenstücken, die mit zwei Füssen auf einem den Turbinenkasten überspannenden Gewölbe ruhen.

Das Maschinengehäuse ist aus Teilen hergestellt, um den Transport zu erleichtern. In magnetischer Hinsicht kann diese Teilung vielleicht zu Bedenken Anlass geben; aber die Erfahrung hat gelehrt, dass die durch eine derartige Teilung entstehenden Fugen im Eisen keinen nachteiligen Einfluss ausüben, zumal gerade bei dieser Art Maschinen der Verlauf der magnetischen Kraftlinien hauptsächlich in radialer und axialer Richtung und nur zum geringsten Teile parallel zur Bohrung erfolgt. Die andere Fuge in der Gürtelzone, die durch die Teilung des Gehäuses in zwei einzelne Ringe bedingt ist, ist ganz ohne jeden Belang, da hier die Kraftlinien-Strömung ganz stetig verlaufen kann.

Die an das Gehäuse angegossenen Füsse halten es in einer Höhe von ca. 0,6 *m* über dem Fussboden, wodurch das Lager unter dem Induktorrade auch während des Betriebes zugänglich bleibt.

Um die Streuungen der magnetischen Linien zu verhüten, die von der Welle durch die beiden Lagerarmkreuze in das Gehäuse überzugehen streben, sind diese beiden Gehäuse magnetisch isoliert, und

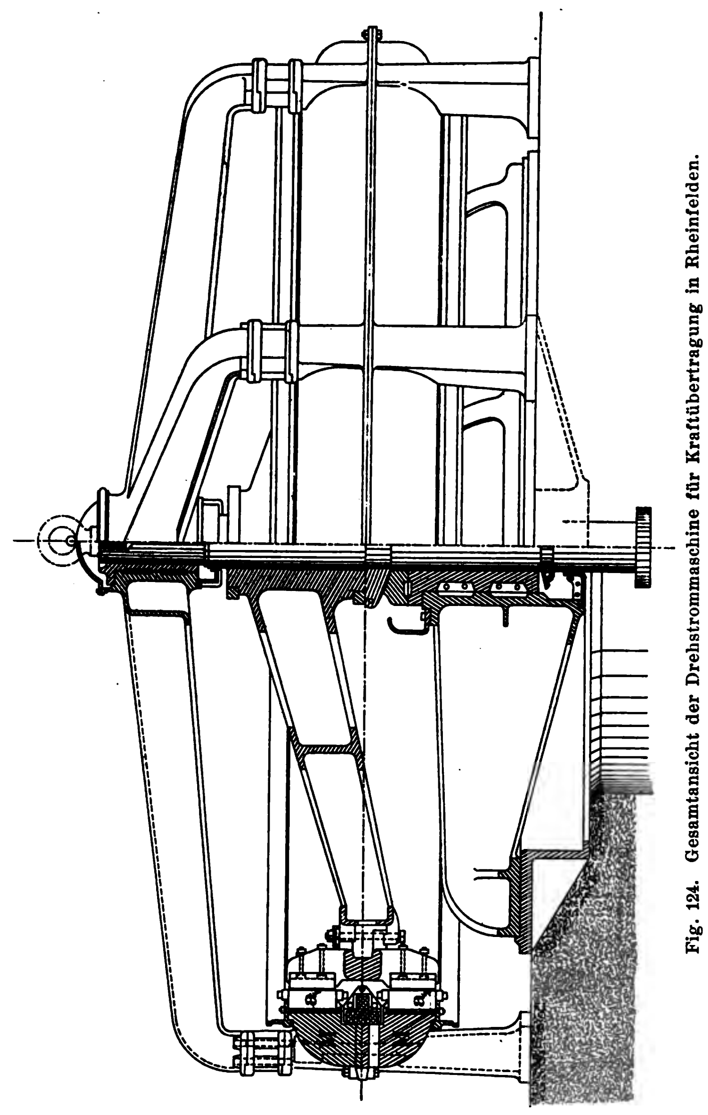


Fig. 124. Gesamtansicht der Drehstrommaschine für Kraftübertragung in Rheinfelden.

zwar das obere durch Einlagen von Bronze zwischen Gehäuse und Kreuz, das untere dadurch, dass die Füsse des Gehäuses nicht auch zugleich auf der Unterlagsplatte des unteren Armkreuzes, sondern

ausserhalb desselben in einem entsprechend weiten Umkreise direkt auf dem Cementboden stehen.

Das Induktorrad (Fig. 124) erhält seine Verbindung mit der Welle durch ein gusseisernes Armkreuz, das aus 5 Sektoren zusammengesetzt ist. An dem Umfange des Armkreuzes ist ein aus 5 Segmenten bestehender Kranz aus Stahlguss befestigt. An jedem Segment sind in gleicher Teilung am Umfange 11 Joche ausgebildet, die den Polen im Gehäuse gegenüberstehen und an ihren Enden zusammengenietete Packete aus dünnem, weichem Eisenblech tragen.

Die Befestigung dieser Packete an den Enden der Joche geschieht durch eine im Rücken des Packetes angebrachte schwalbenschwanzförmige, schmiedeeiserne Leiste, die mittelst Schrauben an das Joch angeschlossen wird. Die Zerteilung der Polhörner hat den Zweck, Wirbelströme in denselben zu vermeiden, die sonst beim Vorübergehen der Hörner vor den Ankernuten entstehen würden.

Die beiden Ankerringe bestehen aus auf einander gelegten, von einander isolierten, segmentförmigen Eisenblechen, die mit versetzten Fugen im Kreise herum und stumpf an einander stossend auf einander gelegt sind. Mit ihrem Rücken stossen sie gegen die cylindrische Wand des Gehäuses und sind dort befestigt.

In die Nuten des Ankers sind die Spulenwickelungen aufgestellt, für jeden der beiden Anker 165. Die Spulen, deren Isolation aus Mikanit besteht, sind so eingerichtet, dass sie in fertigem Zustande aufgeschoben werden. Sie können somit, falls sie schadhaft werden, durch Reservespulen ersetzt werden. Diese Anordnung beansprucht allerdings einen etwas grösseren Raum, als wenn die Spulen direkt auf den Anker gewickelt werden; aber die kleine Raumverschwendung ist ohne Bedeutung gegenüber den Vorzügen der schnellen Montage und Reparatur. Die Wickelung ist mit übergreifenden Spulen ausgeführt.

Bei den äusserst geringen Verlusten durch Stromwärme, Hysteresis und Wirbelströme in der Maschine sind besorgniserregende Temperaturerhöhungen auch bei langem Betriebe nicht zu erwarten, zumal auch die Abkühlungsflächen der Maschinen sehr gross sind. Zahlreiche Luftlöcher im Mantel, die den inneren Raum zwischen den beiden Ankern mit der Aussenluft verbinden, sorgen ausserdem für reichliche Lüftung. Die durch das rotierende Induktorrad radial getriebene Luft wird gezwungen, den Raum zwischen den Ankerspulen und der Magnetspule zu passieren und kühlt sie dadurch in wirksamer Weise ab.

Was die elektrischen Verhältnisse der Rheinfelder Drehstrommaschine anbelangt, so beträgt die normale Leistung der Dynamos 61.5 Ampère bei 3900 Volt per Phase (Spannung zum neutralen

Punkt). Dies ergiebt eine Leistung von 3 × 61,5 × 3900 = 720 Kilowatt. Unter Annahme einer durchschnittlichen Verschiebung der Stromphase durch die angeschlossenen Motoren etc. bis zum cos φ =

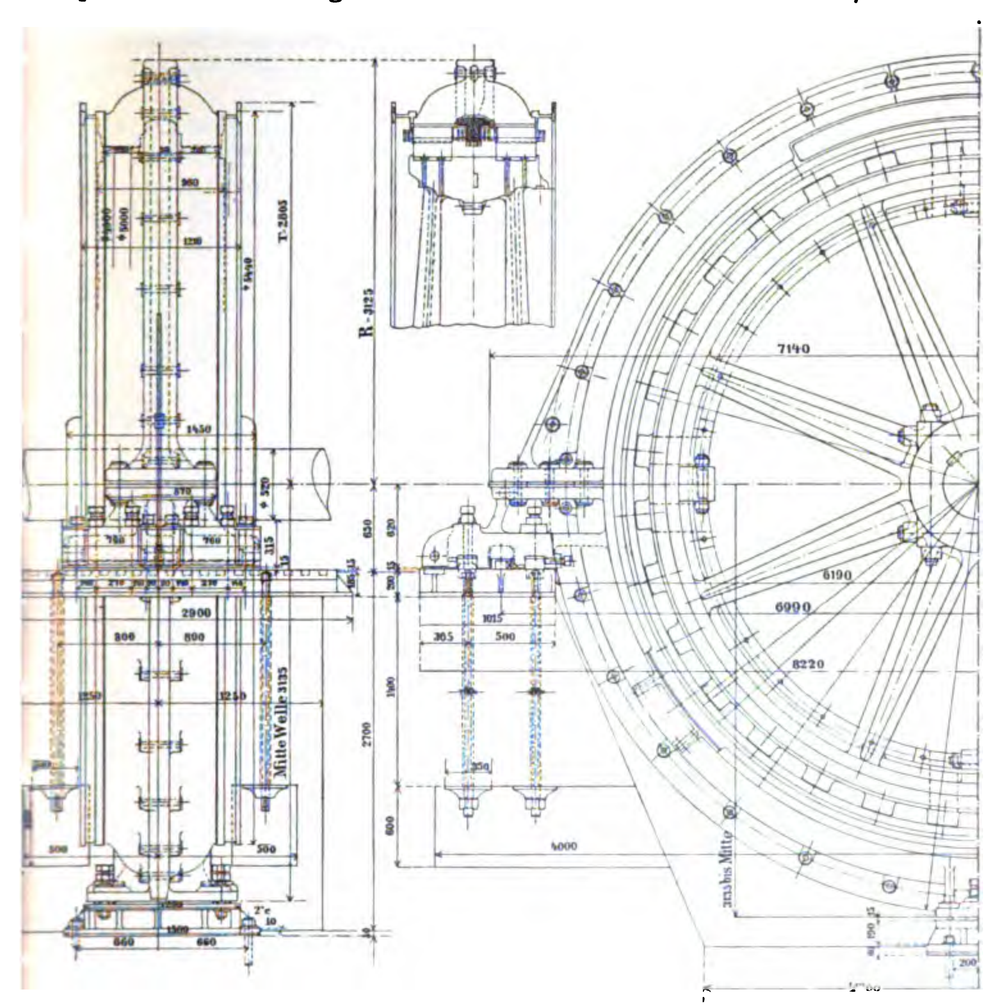


Fig. 125. Grosser Drehstromerzeuger der Maschinenfabrik Oerlikon.

ca. 0,8 würde die obige Leistung nur 580 Kilowatt wirklicher Energie entsprechen und somit an der Welle ca. 840 P S erfordern.

Der gesamte Wirkungsgrad der Dynamos beträgt einschliesslich des Energieaufwandes für die Erregung über 92 %.

6. Der neuste, grosse Drehstromerzeuger der Maschinenfabrik Oerlikon.

Durch die Grösse der Abmessungen und der Leistung übertrifft die in Fig. 125 abgebildete, aus der allerneuesten Zeit stammende Maschine der obengenannten Firma alle übrigen uns bekannt gewordenen Konstruktionen.

Die Anordnung entspricht ziemlich genau der in Fig. 123 dargestellten, jedoch ist die Hauptwelle hier horizontal gelegt, da das Induktorrad unmittelbar mit einer gewaltigen Dampfmaschine gekuppelt werden soll und für diese als Schwungrad dient. Die Leistung beträgt 1300 Pferdestärken. Das Induktorrad macht 75 Umläufe in 1 Minute; unter diesen Umständen ist die Zahl der Wechsel 40 in 1 Sekunde.

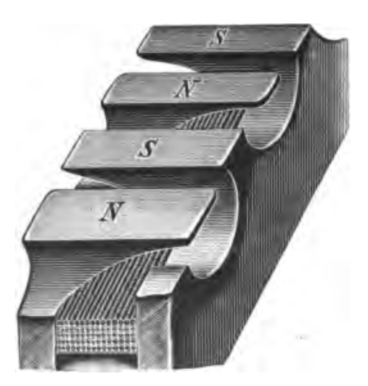


Fig. 126. Ein Stück des rotierenden Feldmagneten nebst Wickelung von einer Drehstrommaschine der älteren Oerlikontype.

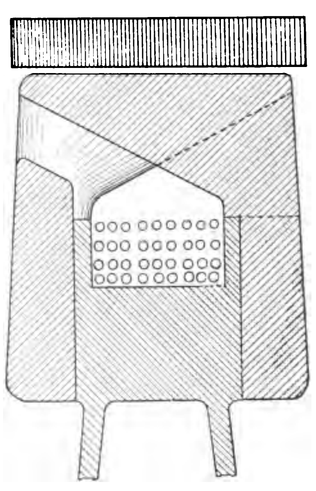


Fig. 127. Querschnitt durch den äusseren Feldmagnetring der Maschinen der älteren Oerlikontype.

Die Schenkelspannung beträgt 240 Volt; um diese hervorzubringen trägt der ruhende Anker $2 \times 40 \times 6$ Stäbe. Die ebenfalls ruhende Feldspule besteht aus 200 Windungen eines Drahtes von 11 *mm* Dicke.

Die Bohrung des Ankers beträgt 5000 *mm*, der Durchmesser der äusseren Oberfläche des umlaufenden Induktorrades 4990 *mm*. Da der Luftzwischenraum zwischen dem Ankereisen und den 32 Polhörnerpaaren des Magnetrades somit nur eine Grösse von 5 *mm* hat, ist hinsichtlich der Centrierung die allergrösste Genauigkeit und Sorgfalt erforderlich. Die Maschine ist bis nahe an die Welle in eine Grube eingebaut, so dass nur wenig mehr als die obere Hälfte

herausragt. Auf der Sohle dieser Grube ruht auf solidem Fundamente der eiserne Rahmen, der den Anker und die Erregerspule trägt. Da es zur Zeit kaum eine zweite Maschine von ähnlicher Grösse geben dürfte, so sind die Abmessungen überall in die Abbildung, die wir der Güte der Maschinenfabrik Oerlikon verdanken, mit eingetragen.

7. Ältere Drehstrommaschine der Maschinenfabrik Oerlikon.

Sehr lehrreich ist es, mit der soeben beschriebenen Drehstrommaschine die älteren Formen zu vergleichen, um die grossen Fortschritte zu erkennen, die in kurzer Zeit (seit 1890) auf diesem Gebiete gemacht worden sind.

Von dauerndem Interesse bleibt die Konstruktionsform der Drehstrommaschinen, durch die im Jahre 1891 die denkwürdige Arbeitsübertragung von Lauffen nach der elektrischen Ausstellung in Frankfurt a. M. so erfolgreich bewerkstelligt wurde. Der Entwurf derselben rührte von C. E. L. Brown, dem damaligen Konstrukteur der Maschinenfabrik Oerlikon, her.

Der Anker dieser Maschine ruht und die Feldmagnete rotieren. Der Feldmagnet besteht aus drei Teilen; aus einem Gussringe mit zwei Flantschen, um den eine einzige Erregerspule gewickelt ist, und zwei an den Gussring angeschraubten Gussstahlringen mit klauenförmig über die Wickelung übergreifenden Polhörnern. (Vgl. Fig. 126.) Wird der Erregerspule Strom zugeführt, so werden die geradzahligen Polhörner, die von der linken Seite über die Wickelung übergreifen, alle nordmagnetisch, und die von der rechten Seite ausgehenden Polhörner alle südmagnetisch. Am abgedrehten Umfange folgen sich somit entgegengesetzte Pole, die durch Luftzwischenräume von einander getrennt sind.

Der grösseren Deutlichkeit wegen ist in Fig. 127 auch noch ein Achsenschnitt durch den äusseren Kranz des rotierenden Feldmagneten dargestellt. Über den Polhörnern ist oben in dieser Abbildung ein Stück des aus Eisenblechen hergestellten Ankerkörpers angedeutet. Bei Maschinen für hohe Spannungen müssen die Aussenflächen der Polhörner aus Eisenblechen gebildet werden, um ein zu starkes Erhitzen der Polspitzen zu vermeiden.

Die Zuführung des das Feld erregenden Gleichstromes erfolgt durch zwei auf der Nabe aufsitzende Schleifringe. Zu diesen Schleifringen gelangt der Strom durch zwei elastische, leitende Metallschnüre, die über zwei am Maschinengestell befindliche metallische Rollen laufen, die ihrerseits mit den Polen einer kleinen Gleichstrommaschine in Verbindung stehen. (Vergl. Fig. 128.)

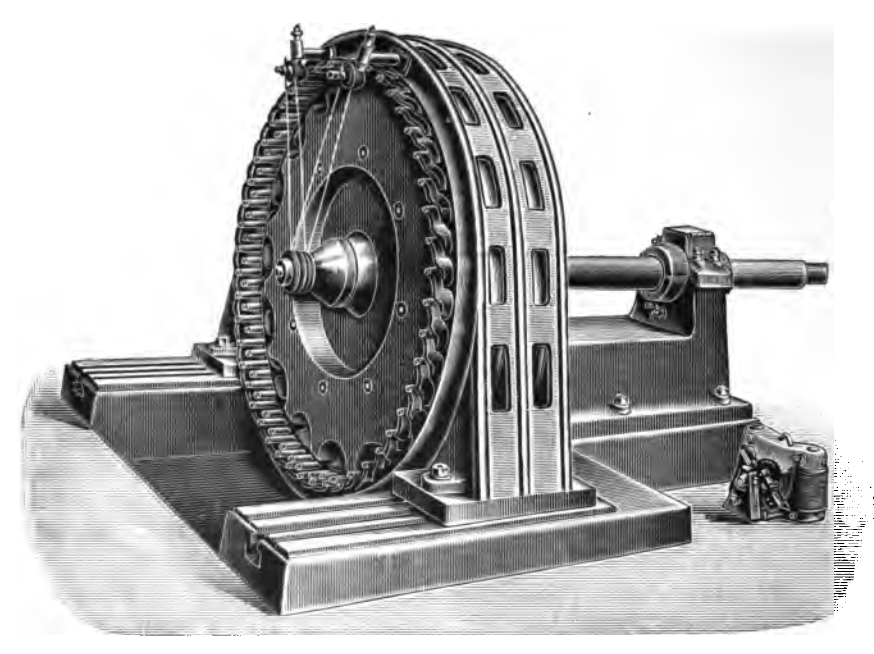


Fig. 128. Drehstrommaschine der älteren Oerlikontype mit feststehendem Anker und rotierender Erregerwickelung.

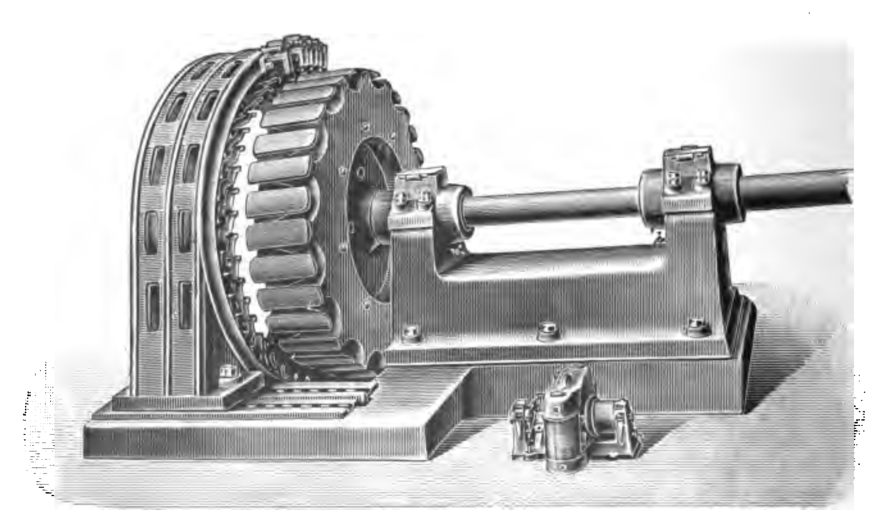


Fig. 129. Drehstrommaschine der älteren Oerlikontype, nachdem die vordere Hälfte des Ankers zurückgeschoben, die hintere entfernt worden ist.

Der Feldmagnet rotiert in einem feststehenden als Anker dienenden Hohlcylinder, der aus Eisenblättern hergestellt und von einem Gussrahmen zusammengehalten wird. Dieser Gussrahmen ruht auf einem Fundamente und kann durch Stellschrauben parallel der Welle verschoben werden, wenn Ausbesserungen nötig sein sollten. (Vergl. Fig. 129). Ganz nahe der inneren Oberfläche sind durch den aus Blättern hergestellten Eisenkern Löcher gebohrt; diese Löcher sind mit einer guten Isolation (Asbeströhren) ausgekleidet und durch diese Röhren sind die die Ankerwickelung bildenden Kupferstangen geführt. Bei einer Maschine für Dreiphasenstrom, deren rotierender Feldmagnet z. B. 32 Polhörner hatte, waren $3 \times 32 = 96$ solcher Stäbe vorhanden. Die Verbindung dieser Kupferstäbe zur Ankerwickelung erfolgte nach folgendem Schema:

1, 4, 7, 10 . . . 91, 94
95, 92, 89, 86 . . . 5, 2
93, 90, 87 . . . . 3, 96

Die Maschine lieferte drei Ströme von je 1400 Ampère, bei 50 Volt Spannung. Der Anker machte 150 Umdrehungen in jeder Minute.

Zwei Spulen werden somit vom Wechselstrome in entgegengesetztem Sinne durchlaufen, wie die dritte, so dass man thatsächlich eigentlich drei um 60° in der Phase gegen einander verschobene Ströme vor sich hat. Die drei Anfänge 94, 2, 96 sind mit einander und einer Klemme I verbunden, wie dies stets bei der Sternschaltung der Fall ist. Die Stäbe 1, 95, 93 stehen mit den drei Polklemmen in leitender Verbindung. Die Ankerwickelung erfolgt als Wellenwickelung nach dem Schema, das in Fig. 115, S. 152, dargestellt ist.

8. Drehstrommaschine der Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft (vormals L. Schwartzkopf).

Der soeben beschriebenen Maschine sehr ähnliche Konstruktionen werden auch noch jetzt für hohe und niedrige Spannungen gebaut. Die in der Überschrift genannte Firma hatte auf der Berliner Gewerbeausstellung im Jahre 1896 die in Fig. 130 abgebildete Drehstrommaschine für 20 Ampère pro Phase bei 2000 Volt Spannung ausgestellt.

Wir teilen hier eine Abbildung dieser Maschine mit, um auch von dieser Type eine massstäbliche Zeichnung zu geben und um zu zeigen, dass diese Form in den Kreisen der Fachleute noch durchaus nicht für veraltet gehalten wird.

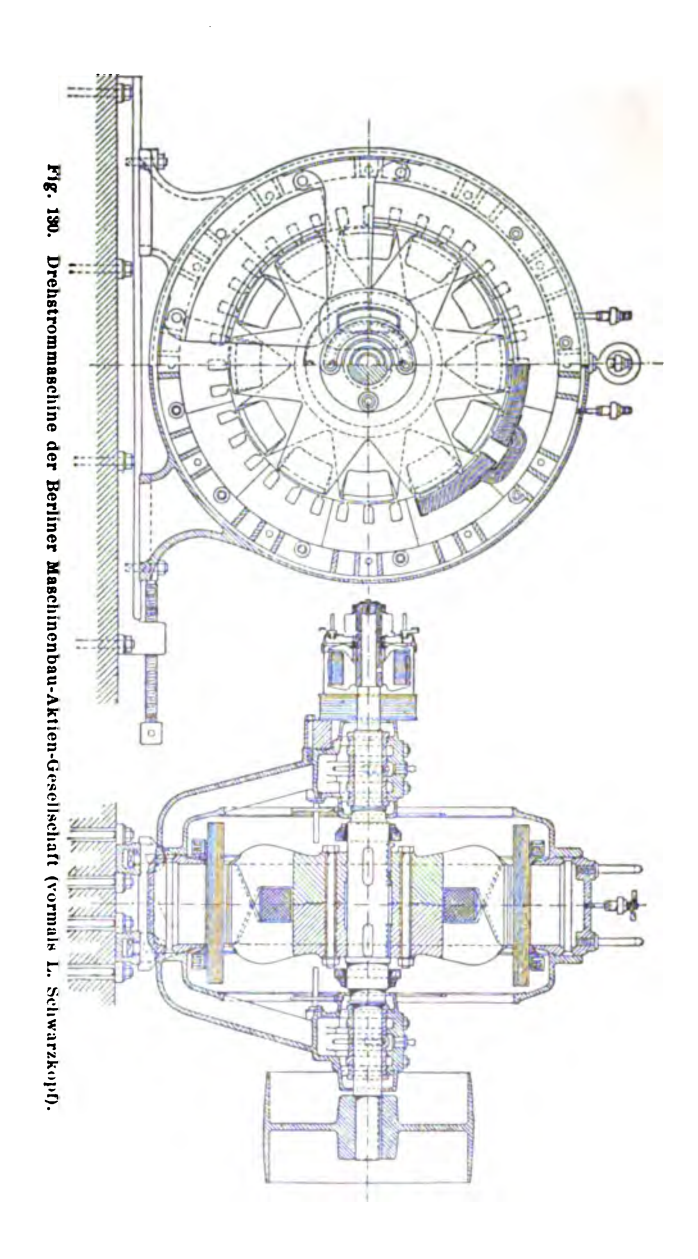


Fig. 130. Drehstrommaschine der Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft (vormals L. Schwarzkopff).

Auch bei dieser Maschine ist die Brown'sche Ankerform mit über die rotierende Spule nach innen übergreifenden Polschuhen (vergl. Fig. 126, S. 166) gewählt. Die Zahl der Pole beträgt 12.

Die Zahl der Ankerspulen ist verhältnismässig gering, jede Phase besitzt deren nur 6, die hinter einander geschaltet sind. Der Widerstand jeder Spule beträgt (kalt gemessen) 0,102 Ohm.

Das Kupfergewicht der gesamten induzierten Wickelung beträgt nur 65 *kg*.

Die eine Spule, durch die alle 12 Pole gleichzeitig erregt werden, besitzt ein Kupfergewicht von 90 *kg* und einen Widerstand (ebenfalls kalt gemessen) von 4,6 Ohm.

Den Erregerstrom liefert eine kleine Gleichstrommaschine für 10 Ampère bei 65 Volt, deren Anker fliegend auf der Maschinenwelle angeordnet ist.

Die Umdrehungszahl beträgt 500.

Die Maschine enthält viel Eisen und verhältnismässig wenig Kupfer, ihre Selbstinduktion ist daher gering. Die Gesamtlänge beträgt 1850 *mm*, die Höhe 1650 *mm*, die Breite 1825 *mm*, das Gewicht der fertigen Maschine 3700 *kg*.

9. Drehstrommaschine der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vormals Schuckert & Co.

Durch eine Anzahl von Eigentümlichkeiten der Konstruktion unterscheidet sich die in Fig. 131a und Fig. 131b in Achsenschnitt und Vorderansicht dargestellte, derselben Type angehörige Drehstrommaschine der in der Überschrift genannten Firma. Besonders die Einrichtung des Ankereisens und die dadurch veranlasste Gestalt der Nuten weicht erheblich von dem ab, was die früher abgebildeten Maschinen erkennen lassen. Die in den Nuten 1, 4, 7, 10 befindlichen Wickelungen werden in genau gleicher Weise induzierenden Wirkungen ausgesetzt und liefern die erste Stromphase; die zweite Stromphase entsteht in den Wickelungen, die in die Nute 2, 5, 8, 11 eingebettet sind, und die dritte Stromphase wird in den Wickelungen hervorgerufen, die in den Nuten 3, 6, 9, 12 untergebracht sind.

Es bedarf kaum der besonderen Erwähnung, dass sowohl das Ankereisen als auch die Oberflächen der über die Wickelung übergreifenden Polhörner der Feldmagneten aus geblättertem Eisen hergestellt sind. Besonders deutlich ist dies auch aus Fig. 131a zu ersehen.

Bei der hier gezeichneten Maschine, die bei 750 Umläufen in der Minute, 50 Perioden in 1 Sekunde, eine Spannung von 300 Volt und in jeder der drei Phasen 58 Ampère Strom zu liefern imstande

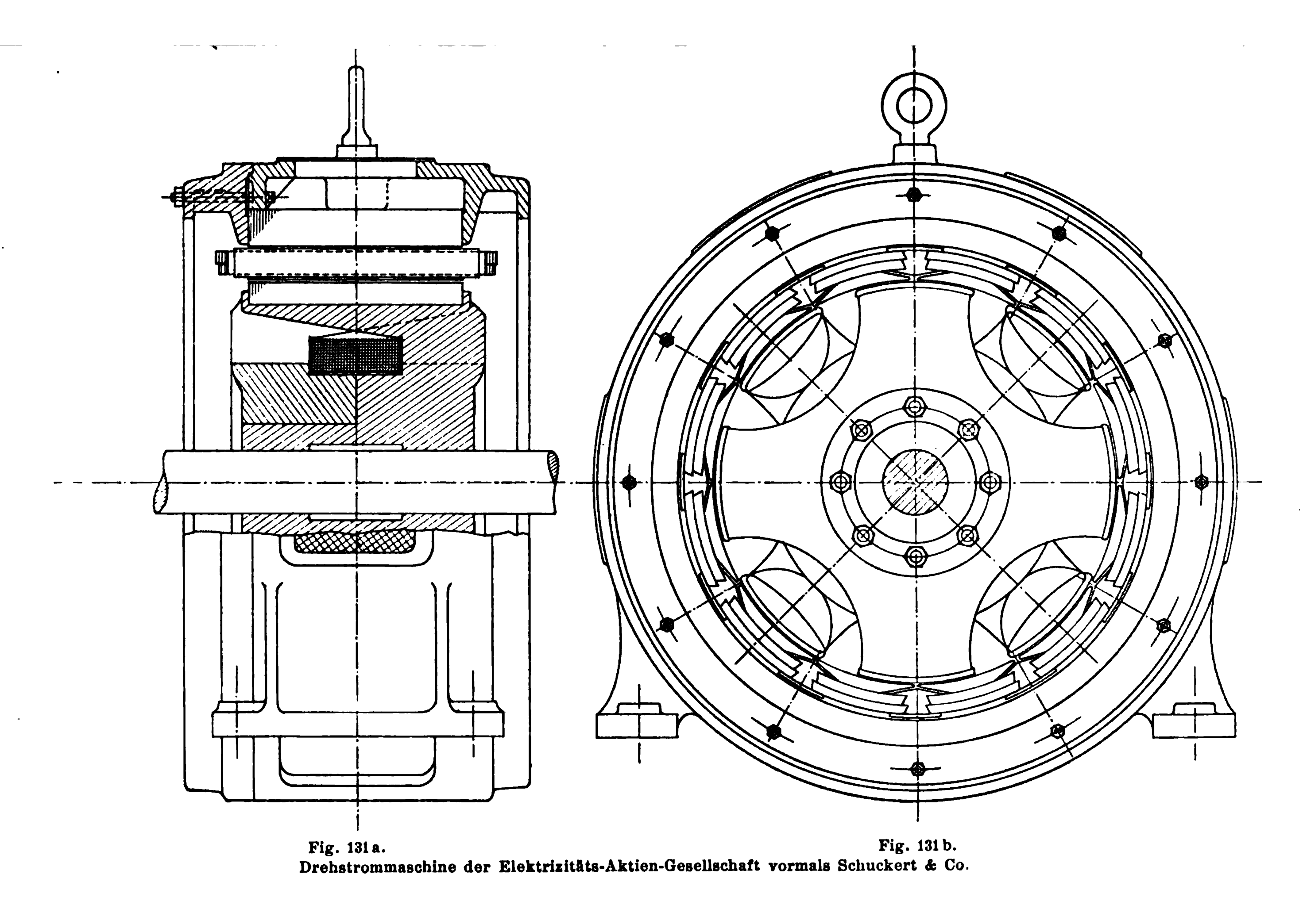


Fig. 131 a. **Fig. 131 b.**

Drehstrommaschine der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vormals Schuckert & Co.

ist, besteht die Wickelung jeder der 12 Spulen aus $11^1/_2$ Windungen von 23 *qmm* Kupferquerschnitt.

Der 8 polige Magnetstern des rotierenden Feldmagneten ist aus Flusseisen hergestellt. Die Erregerspule besteht aus 903 Windungen von 5,3 *qmm* Kupferquerschnitt. Für die Erregung werden bei Vollbelastung 250 Watt verbraucht, das sind nur 0,84 % der Leistung. Zum Teil ist dieser aussergewöhnlich kleine Verbrauch in dem geringen

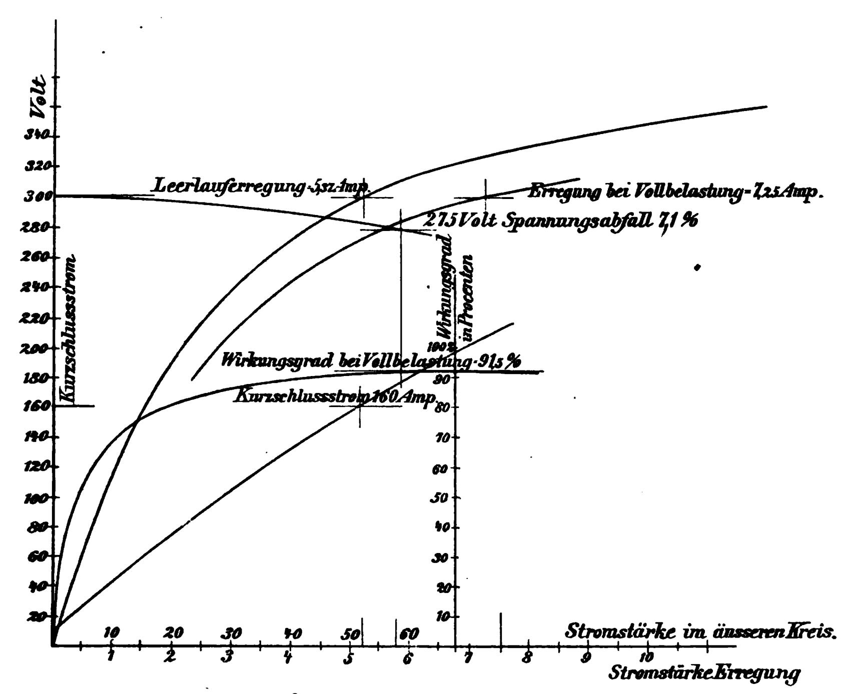


Fig. 132. Abhängigkeit der Klemmenspannung bei Leerlauf und Belastung, sowie des Kurzschlussstromes von der Erregerstromstärke. Wirkungsgrad und Spannungsabfall für verschiedene Stromstärken im inneren Stromkreis für die in Fig. 131 dargestellte Maschine.

magnetischen Widerstand des Materiales, vorzugsweise aber darin begründet, dass der Luftzwischenraum zwischen den auf einem Kreise von 592 *mm* Durchmesser gelegenen Polflächen der Feldmagneten und der Innenfläche des Ankereisens sehr gering ist, nämlich nur 4 *mm*. Die Charakteristik der Maschine, d. i. die Kurve, durch die der Zusammenhang zwischen Erregerstromstärke und Klemmenspannung dargestellt wird, ist sowohl für den Leerlauf als für Belastung in Fig. 132 enthalten.

Ausserdem ist in dieser Figur noch die Linie abgebildet, aus der man bei verschieden starker Erregung des Feldes die Stärke des Stromes ersehen kann, den man erhält, wenn die Klemmen der Maschine durch einen widerstandslosen Draht kurzgeschlossen werden. Aus der Richtung dieser Kurve, die nahezu eine Gerade ist, kann man auf die Rückwirkung des Ankerstromes auf das Feld und auf die Selbstinduktion der Ankerwickelung schliessen.

Endlich ist in diesem Diagramm auch noch die Grösse des Wirkungsgrades in Prozenten und der Spannungsabfall bei einer konstanten Erregung, beide Grössen in ihrer Abhängigkeit von der Stromstärke im äusseren Stromkreise, dargestellt.

Eine derartige graphische Zusammenstellung gestattet, das Verhalten der Maschine nach den verschiedensten Richtungen hin zu beurteilen.

10. Stromerzeuger für Zweiphasenstrom.

Wir haben schon früher wiederholt darauf hingewiesen, dass nur die Ankerwickelung, bei manchen Maschinen sogar nur die Schaltung der Ankerspulen geändert zu werden braucht, um aus einer einfachen Wechselstrommaschine eine Zweiphasenmaschine oder eine Drehstrommaschine zu machen. (Man vergl. auf S. 107 Fig. 70 und auf S. 155 Fig. 119.)

Bei der Zweiphasenmaschine werden zumeist in zwei Ankerwickelungen zwei Wechselströme erzeugt, die einen Phasenunterschied von einer Viertelperiode oder von 90^0 besitzen.

Es sind grosse Energieübertragungen und Verteilungen nach dem Zweiphasensystem durchgeführt worden; selbstverständlich hat man sich dabei aber sowohl für die Stromerzeuger als für die Motoren vielpoliger Anordnungen bedient, um die auch für Lichtbetrieb erforderliche höhere Wechselzahl bei mässigen Umlaufszahlen der Stromerzeuger zu erreichen.

Die Westinghous Co. in Pittsburg in Amerika erzeugt Zweiphasenströme durch zwei fest mit einander verbundene Wechselstrommaschinen mit der früher (Kap. V, Abschn. B 4, S. 122) von uns beschriebenen Einrichtung, deren Feldmagneten und Anker um je den halben Abstand zweier auf einander folgenden Pole versetzt sind. Eine 1000pferdige Maschine derart war auf der Ausstellung in Chicago in Thätigkeit.

Bei einer solchen Verbindung zweier kongruent konstruierter und nur um $^1/_4$ Periode gegen einander verschobenen Maschinen findet keinerlei Ersparnis an Material oder an erregender Energie statt; wir können dieselbe daher nicht zweckmässig finden.

11. Zweiphasenmaschinen von Brown, Boveri & Cie.

Der Anker dieser Maschinen bildet einen feststehenden Ring; innerhalb desselben rotieren die Feldmagneten. Die Ankerwickelung ist in Hohlräume eines eisernen Hohlcylinders eingebettet und die Wickelung ist so angeordnet, dass die den beiden verschiedenen Phasen angehörenden Spulen über einander greifen und mit ihren Mitten um die halbe Entfernung zweier auf einander folgenden, ent-



Fig. 133. Anker einer Zweiphasenmaschine von Brown, Boveri & Co.

gegengesetzten Polmitten von einander abstehen. Fig. 133 zeigt, wie die Spulen in solch einem ruhenden Anker untergebracht sind. Die Feldmagneten, die im Inneren dieses Hohlcylinders umlaufen, sind meist gerade so eingerichtet, wie bei den früher (S. 166, Fig. 126) dargestellten rotierenden Elektromagneten der älteren Wechselstrommaschinen der Maschinenfabrik Oerlikon. Diese eigentümliche Konstruktion ist sogar seiner Zeit von Herrn Brown als er noch der obengenannten Firma als Mitglied angehörte, zuerst angegeben worden.

Bei einigen Maschinen dieser Art wird aber auch die Anordnung der rotierenden Feldmagneten angewendet, die wir bereits bei den

einphasigen Wechselstromerzeugern von Brown, Boveri & Cie. kennen gelernt haben. (Vergl. Fig. 126, Fig. 86.)

Bei dieser Konstruktion werden die runden, mit rechteckigen Polschuhen versehenen Magnetkerne auf dem äusseren Umfange einer breiten, dicken Scheibe, die mit der Nabe ein Stück bildet, mittels starker Zapfen verbunden. Die Erregerspulen werden vorher fertig gestellt und vor dem Einsetzen der Kerne auf diese aufgeschoben.

Bei anderen Maschinen dieser Art wird die halbe Anzahl der Magnetkerne mit der Scheibe aus einem Stück gegossen, während die andere Hälfte der Magnetkerne, die in diesem Falle allein mit Erregerspulen versehen werden, in der vorher beschriebenen Anordnung zwischen die angegossenen Kerne eingesetzt wird. Eine derartige Konstruktion zeigt die Maschine, die wir auf S. 126, Fig. 86, abgebildet haben.

Äusserlich sind die Zweiphasenmaschinen von den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen nicht verschieden; es ist daher nicht nötig, hier nochmals besondere Abbildungen derselben zu geben.

12. Zweiphasenmaschine der Aktien-Gesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke (vormals O. L. Kummer & Co.).

Um an einem Beispiele die konstruktive Durchführung einer Zweiphasenmaschine zu zeigen, teilen wir im nachstehenden die massstäblichen Abbildungen eines derartigen Stromerzeugers mit, die von dem Oberingenieur der vorgenannten Firma, Herrn E. G. Fischinger, herrühren. (Vergl. Fig. 134a und 134b.)

Bei 185 Umläufen in der Minute giebt diese Maschine 50 volle Perioden in 1 Sekunde.

Der Anker des Stromerzeugers ruht und besteht aus 32 übergreifend gewickelten Spulen, je 16 Spulen gehören zu einer Phase. Jede Ankerspule der für 1400 Volt Phasenspannung (verkettete Spannung 2000 Volt) und 38 Ampère Stromstärke in jeder Phase bestimmten Maschine, besteht aus 20 Windungen eines runden Drahtes von 5 *mm* Dicke. Die Wickelung liegt in Nuten mit stark übergreifenden Zähnen. (Vergl. Fig. 134b.)

Das Ankereisen ist aus einzelnen von einander isolierten Blechen zusammengesetzt, die durch einen mehrteiligen, gusseisernen Rahmen zusammengehalten werden.

Die 32 Feldmagneten mit abwechselnd entgegengesetzten Polen sind auf einem gusseisernen Rade befestigt, das durch sechs von be ausgehende Arme mit der Maschinenwelle verbunden ist. der Magneten sind an dem Ende, das dem Anker zuge-

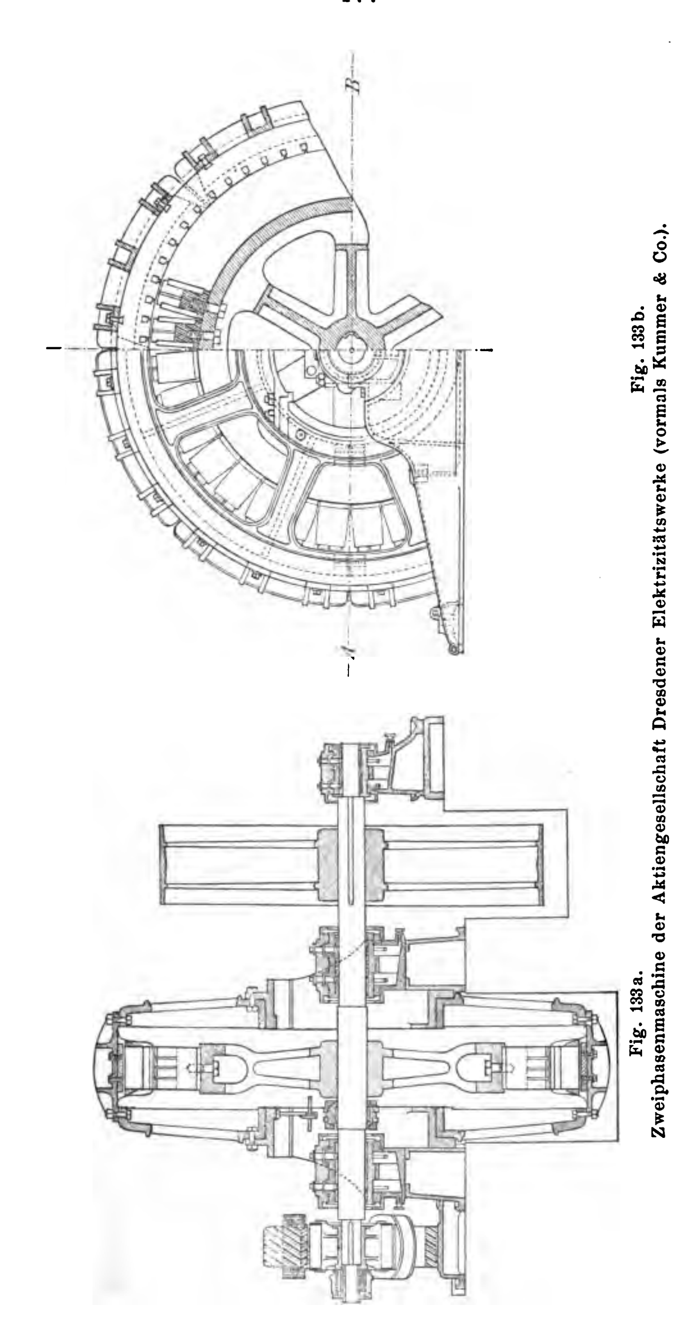


Fig. 133a. Fig. 133b.
Zweiphasenmaschine der Aktiengesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke (vormals Kummer & Co.).

wendet ist, zu etwas über die Spulen übergreifenden Polschuhen ausgebildet. Die Vorsprünge, die dadurch entstehen, dienen gleichzeitig dazu, die Spulen in ihrer Lage festzuhalten.

Die aus weichem Eisen hergestellten Kerne sind mit radialen Schlitzen versehen, um der Entstehung von Wirbelströmen vorzubeugen.

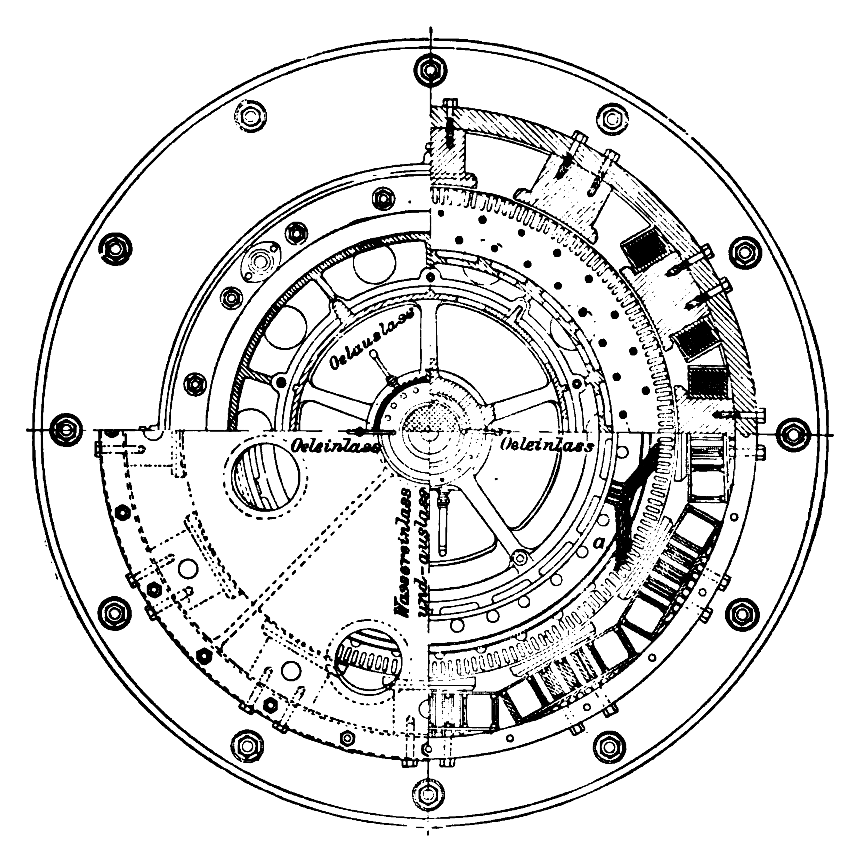


Fig. 134 a. Zweiphasenmaschine der Kraftanlage an den Niagarafällen.

Jede der 32 Erregerspulen besteht aus 240 Windungen eines Drahtes von 4,5 *mm* Durchmesser. Der Strom, der in diesen Windungen fliesst, beträgt 20 Ampère. Die Spulen sind zu je 16 hinter einander und diese beiden Stromkreise parallel geschaltet.

Der zur Erregung erforderliche Gleichstrom wird von einer direkt gekuppelten Dynamomaschine für 65 Volt geliefert, deren Anker fliegend auf der Maschinenwelle angeordnet ist.

Der Luftzwischenraum zwischen dem Eisen der Feldmagneten und dem Ankereisen beträgt nur 5 *mm*.

Die Breite der Maschine in der Richtung A B beträgt 2680 *mm*.

13. Die Zweiphasenmaschine der Arbeitsübertragungsanlage am Niagara.

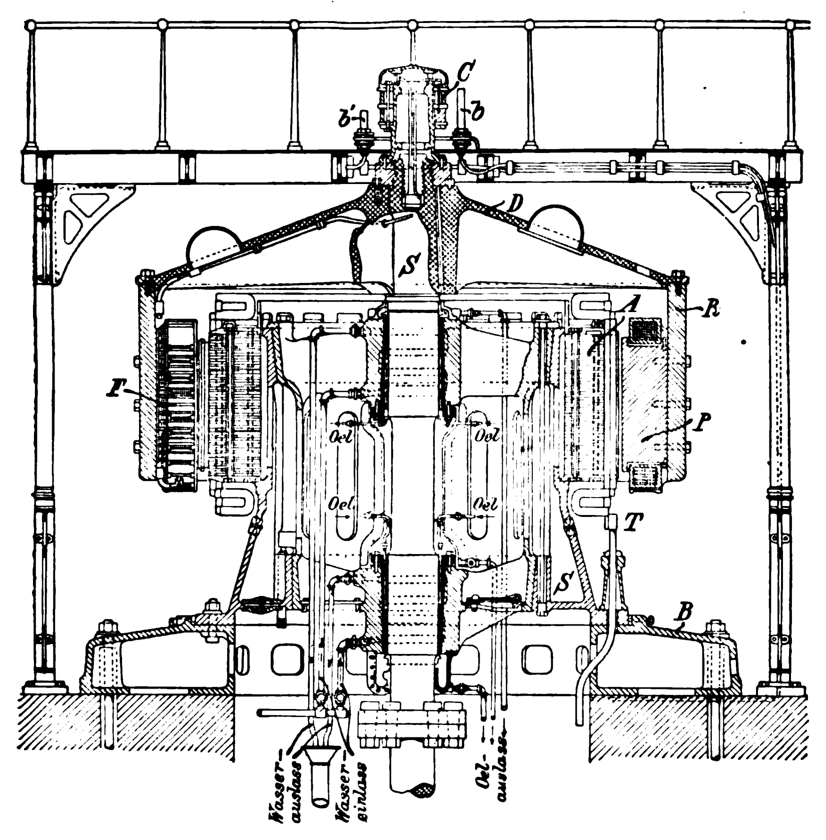


Fig. 134 b.

Auch die gewaltigsten Stromerzeuger der Welt, die bis jetzt gebaut worden sind, die elektrischen Maschinen der Kraftanlage an den Niagarafällen, deren jede die Energie einer der 12 Turbinen von je 5200 PS aufnehmen soll, sind von der Westinghouse Co. gebaute Zweiphasen-Wechselstrommaschinen. Diese Maschinen sind 12 polige Aussenpolmaschinen, deren Anker feststehen; der äussere Magnetkranz macht 250 Umdrehungen in der Minute. Die Zahl der Perioden

beträgt demnach 25 in einer Sekunde. Diese Wechselzahl ist so gering, dass nur Glühlampen mit dicken Kohlenfäden, wie solche zur Hintereinanderschaltung benutzt werden, leidlich ruhig brennen; an die Benutzung von Bogenlampen kann gar nicht gedacht werden, da diese ein merklich flimmerndes Licht geben würden. Es ist so niedrige Wechselzahl gewählt worden, um die Hysteresis- und Wirbelstromverluste möglichst klein zu machen.

Die Konstruktionseinzelheiten dieser interessanten Maschinen werden durch Fig. 134a und 134b veranschaulicht. Es bezeichnet A den feststehenden Ankerkörper, der auf dem Ringträger S ruht, welcher letztere seinerseits mit der Fundamentplatte B verschraubt ist. Da der Ankerkörper unbeweglich ist, so sind keinerlei Schleifringe und Bürsten zur Stromentnahme nötig; vielmehr sind an vier Stellen der festen Ankerwickelung Anschlüsse T vorhanden, welche



Fig. 135. Der rotierende Feldmagnetring der Maschine der Niagara-Kraftanlage.

den hochgespannten Strom durch eine Gussbüchse und die Fundamentplatte hindurch unterirdisch nach dem Schaltbrett leiten. Der rotierende Teil der Maschine besteht aus der Welle S, auf welcher der die Bewegung übermittelnde sogenannte Treiber D aufgekeilt ist; mit ihm ist der Magnetring R verschraubt, der seinerseits die zwölf Polschuhe P mit ihren Magnetspulen F trägt. Das obere Achsenende trägt zwei Schleifringe C, denen der Gleichstrom zur Erregung der Feldmagneten durch Schleifbürsten b, b′ zugeführt wird. Um diese Schleifringe zugänglich zu machen, ist eine Plattform — Bürstenbrücke — aus leichter Eisenkonstruktion aufgerichtet, zu welcher eine ebenso leichte Leiter, wie wir es bei grossen stehenden Dampfmaschinen gewöhnt sind, hinaufführt.

Der Anker ist aus einzelnen Blechscheiben von etwa $^1/_8$ *mm* Dicke zusammengesetzt; jede Blechscheibe für sich besteht wieder aus elf Segmenten, die einander überlappen. Um einen guten Luftumlauf auch innerhalb der Ankerscheiben zu gewährleisten, sind

diese nicht sämtlich fest auf einander gezogen, sondern es sind sechs Spalte von etwa je 25 *mm* gelassen. Um Foucaultströme zwischen den Eisenblechen zu vermeiden, hat man die Scheiben künstlich durch Anlassen oxydiert.

Dieser so aus Eisenblechen aufgebaute Ring wird durch im ganzen 66 Bolzen aus Nickelstahl zusammengehalten. Der Nickelstahl enthält einen sehr erheblichen Prozentsatz Nickel, welches bekanntlich geringwertige magnetische Eigenschaften besitzt, sodass die Bolzen thatsächlich fast unmagnetisch sind. Die Bolzen sind ausserdem isoliert eingezogen.

Die Wickelung des Ankers ist in 187 achsialen, etwa 90 *mm* tiefen und 20 *mm* breiten Nuten untergebracht. Die Nuten sind in jede einzelne Blechscheibe gestanzt; ihre Form ist nicht rechteckig, vielmehr verjüngen sie sich an der Ausmündung und sind dort fast geschlossen. In jeder Nut liegen zwei Flachkupferstäbe von 11 × 34 *mm*, deren Kanten abgerundet sind, damit sie die umhüllende Isolationsschicht nicht durchschneiden. Die aus den Nuten hervorragenden Enden werden durch angesetzte Stücke aus Flachkupfer in ähnlicher Weise zu zwei Spulengruppen verbunden, wie dies in Fig. 134a dargestellt ist. Die Isolation besteht aus Glimmer.

Der umlaufende Magnetring ist aus einem Stück geschmiedet; die zwölf Polansätze sind angeschraubt. Ihre Wickelung besteht aus Kupferstäben, die zu Spulen gebogen sind. Fig. 135 giebt ein Bild des Magnetringes. — Der Gleichstrom wird von einer besonderen Erregerdynamo geliefert und durch die Bürsten b b′ auf die Schleifringe C C übertragen.

Die Entfernung zwischen dem Ankerumfang und den Polschuhen beträgt 25 *mm*.

Die Ankerwickelung bildet zwei von einander getrennte Stromkreise, deren jeder 2400 V abgiebt und gegen den anderen um 90° in der Phase verschoben ist.[1])

Da die Lager schwer zugänglich sind, ist der Schmierung besondere Sorgfalt zugewendet; ausserdem werden die Lager durch einen Wasserstrom, der in Kanälen um dieselben herumläuft, noch besonders gekühlt.

---

[1]) Weitere Einzelheiten findet man in der Zeitschrift des Vereines Deutsch. Ing., Bd. XL. 1896, S. 439, der auch die Abbildungen entnommen sind.

7. Kapitel.

Transformatoren.

1. Begriff des Transformators und Benennungen.

Die Wechselstromtransformatoren sind Vorrichtungen, dazu bestimmt, elektrische Energie A eines Wechselstromes, die durch das Produkt aus Spannung e, Stromstärke i und dem Cosinus des Phasenunterschiedes φ gegeben ist:

$$A = i_p \cdot e_p \cdot \cos \varphi \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

in der Weise in andere Faktoren zu zerlegen, dass wiederum, von unvermeidlichen Verlusten abgesehen,

$$i_s \cdot e_s \cdot \cos \varphi' = A \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

wird.

Für den einfachen Fall, dass $\varphi = \varphi' = o$ ist, ergiebt dies die nur näherungsweise giltige Gleichung:

$$i_p \cdot e_p = i_s \cdot e_s.$$

Das Verhältnis

$$\frac{i_s}{i_p} = \frac{e_p}{e_s} \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

nennt man das Umsetzungsverhältnis des Transformators.

Der Transformator beruht auf den Induktionsgesetzen, und die älteste längst bekannte Einrichtung derart war der Rhümkorff'sche Induktionsapparat.

Während bei den elektrischen Maschinen die Induktion dadurch erzielt wird, dass die Leiter und ein Kraftlinienfeld sich gegeneinander relativ bewegen, so erfolgt bei den Wechselstromtransformatoren die Induktion dadurch, dass man durch eine von einem Wechselstrom durchflossene Spule ein periodisch sich änderndes Kraftlinienfeld erzeugt, und die Änderungen dieses Kraftlinienfeldes in einer zweiten Spule Wechselströme hervorrufen.

Das einfachste Beispiel eines solchen Wechselstromtransformators ist ein in sich geschlossener Eisenring, auf den zwei Spulen aufgewickelt sind. Sendet man in die eine dieser Spulen einen Wechselstrom, so entsteht in dem Eisenkerne ein periodisch veränderliches

Kraftlinienfeld. Da auch die zweite Spule dieselben Kraftlinien umschliesst, so wird in dieser ein Wechselstrom induziert.

Die im Eisenkern erzeugte Kraftlinienzahl ist dem Produkte aus Windungszahl und Stromstärke, die Stromstärke dem Spannungsunterschiede an den Klemmen proportional.

Die in der zweiten Spule induzierte EMK ist der Anzahl der auftretenden und verschwindenden Kraftlinien und der Windungszahl proportional.

Die in den beiden, dieselben Kraftlinien umschliessenden Spulen thätigen EMKräfte sind daher den beiden Windungszahlen proportional. Man hat somit die Möglichkeit, durch die Wahl des Verhältnisses der Zahl der Windungen der beiden Spulen jedes beliebige Umsetzungsverhältnis zu erreichen.

Das Umsetzungsverhältnis ist daher sehr nahe gleich $\frac{n_p}{n_s}$, wenn mit n_p die Windungszahl der einen Spule, und mit n_s die Windungszahl der anderen Spule bezeichnet wird.

Diejenige Spule, der ein umzusetzender Wechselstrom zugeführt wird, heisst die primäre Spule oder primäre Wickelung; die Spule, in der ein induzierter Wechselstrom entsteht, der dann anderweite Verwendung finden soll, wird die sekundäre Spule genannt.

2. Geschichtliches über die Transformatoren.

Obgleich schon früher Vorschläge gemacht worden waren, die elektrische Energie einer Wechselstromquelle durch Induktionsapparate gleichzeitig an verschiedenen Verwendungsstellen nutzbar zu machen, so gebührt doch L. Gaulard und J. D. Gibbs das Verdienst, zum ersten Male brauchbare Transformatoren in grösserem Massstabe zu diesem Zwecke hergestellt und zur praktischen Anwendung gebracht zu haben. Gelegentlich der Ausstellung in Turin im Jahre 1884 haben die Genannten durch eine in Lanzo aufgestellte Wechselstrommaschine längs einer im ganzen 80 *km* langen, aus 3,7 *mm* starken Bronzedraht bestehenden Leitung die primären Wickelungen der Transformatoren, die in Lanzo, Venaria und Turin aufgestellt waren, mit Wechselstrom gespeist und von den sekundären Wickelungen aus an den betreffenden Orten befindliche Glühlampen und Bogenlampen in Thätigkeit gesetzt. Die Transformatoren waren aus offenen Ringen von gestanztem Kupferblech aufgebaut. In dem Hohlraume der Ringe befand sich ein Eisenkern, der verschieden tief eingesenkt werden konnte. Die vorspringenden Enden der von einander isolierten Kupferringe waren abwechselnd mit einander verbunden, so dass z. B. die

ungeradzahligen die primäre, die geradzahligen die sekundäre Wickelung bildeten.

Zumeist hatten die Transformatoren von Gaulard und Gibbs daher ein Umsetzungsverhältnis 1 : 1, und das war sehr wohl angängig, da bei diesem Verteilungssysteme die primären Windungen sämtlicher thätiger Transformatoren hinter einander geschaltet waren.

Gaulard und Gibbs haben jedoch auch schon Transformatoren gebaut, bei welchen z. B. der 1., 4., 7. . . . . Ring verbunden waren, und die eine Wickelung bildeten, während die übrigen Ringe, hinter einander verbunden, die andere Wickelung bildeten. Die Behauptung, dass diese Pioniere der Transformatorentechnik nur das Umsetzungsverhältnis 1 : 1 verwendet hätten, ist somit nicht richtig. Auch Transformatoren mit ringförmigen Eisenkernen haben sie schon auf der Ausstellung in Turin einzelnen Elektrotechnikern gezeigt. Allem Anscheine nach haben sie aber weder Transformatoren mit anderem Umsetzungsverhältnisse als 1 : 1, noch solche mit ringförmigen Eisenkernen in technisch irgendwie erheblichem Massstabe praktisch angewendet.

Das Verdienst, Transformatoren mit beliebigem Umsetzungsverhältnis, geschlossenem Eisenkerne und aus Drähten hergestellten Wickelungen zuerst hergestellt und mit technischem Erfolge benutzt zu haben, gebührt den Ingenieuren der Fabrik von Ganz & Co., den Herren Zipernowsky, Déri und Bláthy. —

Während Gaulard und Gibbs die Transformatoren in Hintereinanderschaltung anwendeten und damit nur eine unvollkommene Regulierung erreichen konnten, haben Ganz & Co. von Anfang an sich der Verteilung elektrischer Energie eines Wechselstromes durch parallel geschaltete Transformatoren bedient und damit die moderne glänzende Epoche der Entwickelung der Wechselstromtechnik angebahnt.

3. Die Theorie der Wechselstromtransformatoren unter Vernachlässigung der Streuung, der Hysteresis und der Foucaultströme.

Einen idealen Transformator ohne Streuung und ohne Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme kann es allerdings in Wirklichkeit nicht geben; thatsächlich sind aber bei gut konstruierten derartigen Apparaten diese störenden Einflüsse von geringer Bedeutung, so dass ihre Berücksichtigung nur verhältnismässig kleine Korrektionen erfordert.

Wenn wir durch die primäre Spule eines Transformators einen Wechselstrom senden, wird in dem Eisenkern ein periodisch wechselndes Kraftlinienfeld erzeugt. Für den Fall, dass die magnetische

Induktion selbst im Maximum der Feldstärke einen verhältnismässig niedrigen Betrag nicht überschreitet, kann man ohne merklichen Fehler annehmen, dass die Permeabilität konstant und die Feldstärke der magnetomotorischen Kraft, d. h. dem Produkte aus Stromstärke und Windungszahl der Spule, proportional ist. Das magnetische Feld wird daher sich in derselben Weise periodisch ändern, wie der Wechselstrom; zwischen der EMK des primären Wechselstromes und der Feldstärke besteht jedoch ein Phasenunterschied von einer Viertelperiode (vergl. Kap. II, Abschn. 2., S 19); das magnetische Feld ist um eine Viertelperiode gegen die EMK des Wechselstromes verspätet, der dasselbe erzeugt.

Da bei einem Transformator ohne Streuung die sekundäre Wickelung alle Kraftlinien umfasst, die durch Wechselstrom erzeugt werden, so befindet sich innerhalb der sekundären Wickelung ein Kraftlinienfeld, das periodisch von Null bis zum positiven Maximum $+\Phi_{max}$ wächst, dann durch Null hindurch bis zu einem gleich grossen negativen Maximum $-\Phi_{max}$ abnimmt, hierauf wieder bis Null zunimmt u. s. f.

Dadurch wird in der sekundären Wickelung eine EMK induziert, deren Phase gegen die des Feldes wiederum um eine Viertelperiode verspätet ist.

Daraus folgt, dass die EMK, die in der sekundären Wickelung induziert wird, gegen die in der primären Spule wirksame EMK um eine halbe Periode oder 180° verspätet, d. h. ihr gerade entgegengesetzt ist. Zwischen der Phase der primären und der sekundären EMK liegt die Phase der magnetischen Felder gerade in der Mitte.

Nennen wir das bald positive, bald negative Maximum des in dem Eisenkern induzierten Kraftlinienfeldes Φ_{max}, so ist die zu seiner Erzeugung erforderliche maximale EMK, deren Grösse wir mit E_p bezeichnen wollen:

$$E_p = 2\pi \sim \Phi_{max} \cdot n_p \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5)$$

(vergl. Grundzüge VII, 4, S. 112, Formel 5, und S. 113, Formel 6).

Hierin ist n_p die Anzahl der Windungen der primären Spule, $\sim$ die Zahl der vollen Perioden des Wechselstromes in 1 Sekunde $\left(\sim = \frac{1}{T}\right)$.

Die maximale in der sekundären Wickelung des Transformators induzierte EMK E_s ist ebenso:

$$E_s = 2\pi \sim \Phi_{max} \cdot n_s \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6)$$

wenn n_s die Windungszahl der sekundären Spule bedeutet.

Daraus folgt:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{n_p}{n_s} = u \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

d. h. die maximalen EMKräfte, die in der primären und der sekundären Spule eines Transformators thätig sind, verhalten sich wie die Windungszahlen der primären und der sekundären Wickelung. Dieser Quotient ist die Grösse, die wir schon v rher mit dem Namen Umsetzungsverhältnis bezeichnet haben.

Die maximalen Werte der EMK unterscheiden sich von den effektiven Werten, die ein Hitzdrahtvoltmeter oder ein für Spannungsmessungen geeignetes Elektrodynamometer angiebt, bekanntlich nur durch den Faktor $\sqrt{2}$, $\frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = E_{eff}$ (vgl. Kap. I, Abschn. 7., S. 13, Gl. 5); daraus folgt, dass auch die effektive, in der Sekundärspule induzierte EMK sich zu der in der primären Wickelung wirksamen effektiven EMK verhält, wie sich die Windungszahl der sekundären Spule zur Windungszahl der primären Spule verhält.

Es zeigt sich somit, dass der Transformator ein bequemes Mittel ist, um hohe Spannungen in niedrige und umgekehrt umzusetzen.

Aus den Induktionsgesetzen lassen sich unter Anwendung der höheren Mathematik auch strengere Formeln und die Phasenunterschiede des primären und sekundären Stromes gegen die EMKräfte bestimmen.

Bezeichnet man mit L_p und L_s die Selbstinduktionskoëffizienten der primären und sekundären Wickelung und mit $M = \sqrt{L_p \cdot L_s}$ den Koëffizienten der gegenseitigen Induktion beider Stromkreise, (vergl. Kap. II, Abschn. 2., S. 25, Gl. 13), so erhält man nach Maxwell für die maximale Stärke des Primärstromes J_p den Ausdruck:

$$J_p = \frac{E_p}{\sqrt{\varrho^2 + \omega^2 \lambda^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8)$$

Die Phasenverzögerung φ des primären Stromes hinter der primären EMK bestimmt die Formel . . . . 9)

$$\tan \varphi = \frac{\omega \lambda}{\varrho}$$

In diesen Formeln sind ϱ und λ Abkürzungen für folgende Ausdrücke:

$$\varrho = w_p + \frac{\omega^2 M^2}{w_s^2 + \omega^2 L_s^2} \cdot n_s \qquad \lambda = L_p - \frac{\omega^2 M^2}{w_s^2 + \omega^2 L_s^2} \cdot L_s,$$

wobei w_p den Widerstand der primären Wickelung und w_s den Widerstand des sekundären Stromkreises bedeuten.

Diese Formeln gelten unter der Voraussetzung, dass an den Klemmen der primären Wickelung eine EMK

$$e = E_p \cdot \sin \omega t$$

von rein sinoidaler Form thätig ist.

Für die maximale Stromstärke J_s, die im sekundären Stromkreise herrscht, erhält man

$$J_s = \frac{\dfrac{\omega M E_p}{\sqrt{\varrho^2 + \omega^2 \lambda^2}}}{\sqrt{w_s^2 + \omega^2 L_s^2}} \quad \ldots\ldots\ 10)$$

Für die Phasenverzögerung χ des sekundären Stromes hinter dem primären erhält man:

$$\chi = 90 + \psi, \quad \tan \psi = \frac{\omega L_s}{w_s} \quad \ldots\ldots\ 11)$$

Der sekundäre Stromkreis besteht aus zwei Teilen, aus den auf dem Transformator befindlichen Windungen, deren Widerstand w_s', und deren Selbstinduktionskoëffizient L_s' sein mag, und aus der Belastung, deren Leitungswiderstand mit w_s'', und deren Selbstindukionskoëffizient mit L_s'' bezeichnet werden soll.

Demnach ist:

$$w_s = w_s' + w_s'' \text{ und } L_s = L_s' + L_s''.$$

Gebraucht man für die maximale sekundäre Klemmenspannung des Transformators den Buchstaben K_s, so ist $K_s = E_s - w_s' \cdot J_s$, gleich der um den Spannungsverlust in der Sekundärspule verminderten sekundären E M K.

Zwischen J_s und K_s aber muss nach den für Wechselströme giltigen Gesetzen die Beziehung bestehen:

$$J_s = \frac{K_s}{\sqrt{w_s''^2 + \omega^2 L_s''^2}} \qquad K_s = J_s \cdot \sqrt{w_s''^2 + \omega^2 \cdot L_s''^2} \quad .\ 12)$$

Führt man hierin für J_s seinen Wert aus Gleichung 10 ein, so ergiebt sich:

$$K_s = \frac{\omega \cdot M\ E_p}{\sqrt{\varrho^2 + w^2 \lambda^2}} \cdot \frac{\sqrt{w_s''^2 + \omega^2 \cdot L_s''^2}}{\sqrt{w_s^2 + \omega^2 L_s^2}} \quad \ldots\ 13)$$

Die Stromstärke J_s im sekundären Strome wird nun sehr klein, wenn der Nenner in der Formel für J_s sehr gross wird, d. h. wenn entweder der äussere Widerstand sehr gross oder die Selbstinduktion, oder beide Grössen gleichzeitig sehr gross sind. Da der Widerstand und der Selbstinduktionskoëffizient der Wickelung der sekundären Wickelung meist kleine Grössen sind, kann man n_s mit n_s'', und L_s mit L_s'' ohne erhebliche Fehler gleich setzen. Der zweite Bruch in der Formel für K_s wird daher näherungsweise gleich 1 gesetzt werden können.

Ausserdem kann dann ebenfalls näherungsweise $\lambda = L_p$ gesetzt und ϱ gegen ωL_p vernachlässigt werden.

Dann wird angenähert

$$K_s = \frac{M}{L_p} \cdot E_p \quad \ldots\ldots \quad 14)$$

Nun ist aber für zwei Wickelungen, die, ohne dass Streuung eintritt, dasselbe Kraftlinienfeld umfassen und sich vollständig überdecken:

$$M = \sqrt{L_p \cdot L_s} \quad \ldots\ldots \quad 15)$$

Man erhält somit

$$\frac{E_p}{K_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad \ldots\ldots \quad 16)$$

Der Selbstinduktionskoëffizient L einer Spule ist aber (vergl. Kap. II, Abschn. 2., S. 25, Gl. 11) dem Quadrate der Windungszahl der Spule proportional; berücksichtigt man dies, so ergiebt sich:

$$\frac{E_p}{K_s} = \frac{n_p}{n_s} = u \quad \ldots\ldots \quad 17)$$

in Übereinstimmung mit der auf S. 185, Formel 7, von uns abgeleiteten Grundgleichung.

Die Klemmenspannung K_s ist nämlich von der sekundären EMK E_s meist nur so wenig verschieden, dass man ihre Differenz vernachlässigen kann.

Die Formel gilt streng, wie man sofort erkennt, wenn der sekundäre Stromkreis offen, n_s'' unendlich gross ist, aber selbst wenn der Widerstand n_s'' und die Selbstinduktion L_s'' klein, die Belastung des Transformators aber gross sind, betragen die Fehler, die man durch diese Vereinfachungen begeht, die zur Formel 17 geführt haben, nicht mehr als etwa 3 %.

Es folgt daraus, dass die sekundäre Klemmenspannung K_s eines Transformators, an dessen primären Klemmen eine konstante Spannung erhalten wird, ebenfalls nur wenig veränderlich ist. Auf dieser Eigenschaft der Transformatoren beruht ihr hoher Wert für die Verteilung elektrischer Energie durch parallelgeschaltete derartige Apparate.

Die Phasenverzögerung des sekundären Stromes gegen die sekundäre EMK wird bestimmt durch:

$$\tan \delta = \frac{\omega L_s''}{w_s} \quad \ldots\ldots \quad 18)$$

und die Phasenverzögerung φ' dieses Stromes gegen die Klemmenspannung K_s durch

$$\tan \varphi' = \frac{\omega L_s''}{w_s''} \quad \ldots\ldots \quad 19)$$

Die Richtungen dieser verschiedenen Grössen sind als Vektoren in nebenstehender Fig. 136 eingetragen.

Auch den Wirkungsgrad eines solchen idealen Transformators ohne Streuung und ohne Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme kann man leicht bestimmen.

Die zugeführte elektrische Energie A_p hat den Wert

$$A_p = J_p \cdot E_p \cdot \cos\varphi \quad \ldots\ldots\ldots \quad 20)$$

Die an den sekundären Klemmen abgegebene elektrische Energie A_s hat die Grösse

$$A_s = J_s \cdot K_s \cdot \cos\varphi \quad \ldots\ldots\ldots \quad 21)$$

Der Wirkungsgrad W ist somit:

$$W = \frac{J_s \cdot K_s \cdot \cos\varphi'}{J_p \cdot E_p \cdot \cos\varphi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 22)$$

Nennt man v_p und v_s die Verluste durch Stromwärme in der primären und sekundären Wickelung, so kann bei einem solchen idealen Transformator für W auch der Ausdruck aufgestellt werden:

$$W = \frac{A_s}{A_s + v_p + v_s} \quad 23)$$

Bei einem wirklichen Transformator kommen im Nenner noch die Verluste im Eisen durch Hysteresis und Wirbelströme und zu dem ganzen Bruch ein von 1 wenig verschiedener Faktor hinzu, der sich auf die magnetische Streuung bezieht.

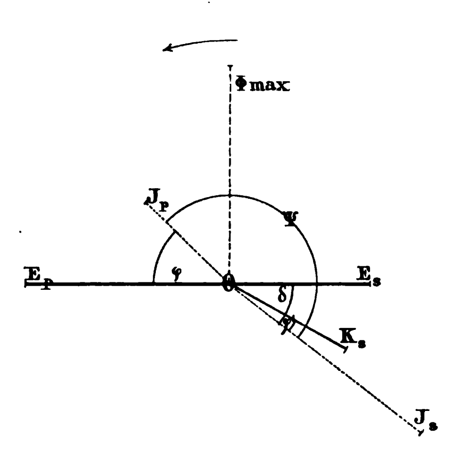


Fig. 136. Phasenunterschiede der Stromstärken, Spannungen und des Magnetfeldes bei einem belasteten Transformator.

Für einen kleinen Transformator für 3 Kilowatt hat Benischke[1]) die vorstehenden Rechnungen durchgeführt; wir teilen in umstehender Tabelle einen Teil der von ihm gefundenen, sehr lehrreichen Zahlen mit.

Der Transformator ist für 2200 Volt bei einem Umsetzungsverhältnis u = 20 bestimmt, soll somit sekundär 110 V geben.

Es ist angenommen, dass die Periodenzahl $\sim = 48$, somit $2\pi \sim = 300$; $L_p = 4$, $L_s' = 0{,}01$ und somit $M = \sqrt{L_p \,.\, L_s'} = 0{,}2$, ferner $w_p = 8\ \omega$, $w_s' = 0{,}02\ \omega$ betrage. Die Zahl der im Maximum induzierten Kraftlinien beträgt 1 727 000.

[1]) G. Benischke, Magnetismus und Elektrizität, Berlin-München, Springer-Oldenbourg 1896, S. 185.

Sekundärer Stromkreis		Primäre Stromstärke	Sekundäre Stromstärke	Klemmenspannung		Phasenverschiebungen				Wirkungsgrad W
Aeusserer Widerstand w''_s Ohm	Selbstinduktion der Belastung L''_s Henry	J_p Ampère	J_s Ampère	Prim. Volt	Sekund. Volt	φ	φ'	χ	ζ	in Prozenten
∞	0	1,8	0	2200	110	89° 37′	—	—	—	0
100	0	1,8	1,1	2200	110	87° 53′	0	91° 43′	90°	81,2
20	0	1,9	5,5	2200	110	81° 5′	0	98° 32′	90°	95,9
5	0	2,1	21,3	2200	107	60° 33′	0	120° 58′	90	98,3
1	0	5,6	106,0	2200	106	17° 45′	0	161° 13	90	95,4
5	0,05	2,2	7,0	2200	110	86° 38′	71° 34′	164° 29′	161° 34′	83,3
2	0,02	2,7	17,4	2200	110	83° 30′	71° 34′	167° 20′	161° 34′	91,4
2	0,01	3,2	30,4	2200	109,6	73° 58′	56° 19′	161° 24′	146° 19′	95,0

Hierin ist φ die Phasenverschiebung des primären Stromes J_p gegen die primäre E M K E_p; φ' ist die entsprechende Grösse für den sekundären Strom. Unter χ versteht man die Phasenverzögerung des sekundären gegen den primären Strom, während ζ die Phasenverzögerung des sekundären Stromes gegen das Magnetfeld ist.

Die vorstehende Tabelle zeigt, dass mit zunehmender Belastung die primäre Stromstärke zunimmt, und die Phasenverschiebung φ zwischen der primären Stromstärke und primären E M K sich vermindert.

So lange die Belastung frei von Selbstinduktion ist ($L_s'' = o$), befindet sich die sekundäre Klemmenspannung in gleicher Phase mit dem sekundären Strome. Die Phasenverzögerung φ' des sekundären Stromes hinter der sekundären Klemmenspannung ist um so grösser, je grösser die Selbstinduktion (L_s'') der Belastung ist; sie nähert sich schon bei mässigen Beträgen von L_s'' einem rechten Winkel oder einer Viertelperiode.

Der Wirkungsgrad W eines Transformators erreicht bei induktionsfreier Belastung ein Maximum für einen mittleren Wert und nimmt für sehr grosse und für sehr kleine Widerstände wieder ab, um sowohl bei offenem sekundären Kreise $n_s'' = \infty$, als auch bei Kurzschluss $w_s'' = 0$ den Wert Null anzunehmen.

Bei Belastung durch Widerstände mit Selbstinduktion sinkt mit wachsender Selbstinduktion der Wirkungsgrad.

4. Graphische Darstellung der Vorgänge im Transformator und Einfluss der Veränderlichkeit der Permeabilität.

Wenn man von der Einführung der Koëffizienten der Selbstinduktion absehen will, kann man die elementare Theorie des Transformators auch noch in etwas anderer Weise darstellen, die in einige

weitere Eigenschaften dieser wichtigen Apparate Einsicht gewährt. Man geht dabei aus von dem im Eisen des Transformators erzeugten magnetischen Kraftlinienfelde.

Zur Entstehung desselben tragen sowohl die Ampèrewindungen der primären als die der sekundären Spule bei, und es ist (vergl. Grundzüge V, 3, S. 77) die erzeugte Kraftlinienzahl

$$\Phi = 0{,}4\,\pi \cdot \frac{i_p \cdot n_p + i_s \cdot n_s}{\mathfrak{w}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 24)$$

wenn man unter $\mathfrak{w}$

$$\mathfrak{w} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\lambda}{S}$$

den magnetischen Widerstand des mittleren Weges λ der Kraftlinien in einem Eisenkörper vom Querschnitte S und der Permeabilität μ versteht. Nimmt man nun an, dass das Feld sich genau nach einer Sinusfunktion ändere, so ist:

$$\Phi = \Phi_{max} \cdot \sin \omega t \cdot \quad (\omega = 2\,\pi \sim) \quad . \; . \; . \; . \; 25)$$

Die in der sekundären Spule durch die Änderungen der Kraftlinienzahl induzierte EMK e_s ist alsdann

$$e_s = n_s \cdot \pi \cdot \Phi_{max} \cdot \cos \omega t \quad . \; . \; . \; . \; . \; 26)$$

Vernachlässigt man die Selbstinduktion der wenigen Windungen der sekundären Spule (setzt also $L'_s = o$) so ist:

$$i_s = -\frac{n_s \cdot \omega \cdot \Phi_{max}}{w_s} \cdot \cos \omega t \text{ und } J_s = \frac{n_s \cdot \omega \cdot \Phi_{max}}{w_s} \quad . \; 27)$$

Wenn man diese Werte in Gl. 24 einsetzt und i_p berechnet, erhält man:

$$i_p = \frac{\mathfrak{w}}{0{,}4\,\pi\, n_p} \cdot \Phi_{max} \cdot \sin \omega t + \frac{n_s}{n_p} \cdot J_s \cdot \cos \omega t \quad . \; . \; 28)$$

Bezeichnet man nun mit β die Phasenvoreilung des primären Stromes gegen die Phase des magnetischen Feldes des Transformators und nimmt man an, dass der zeitliche Verlauf der primären Stromstärke mit genügender Genauigkeit ebenfalls durch eine Sinoide dargestellt werden könne, so kann man:

$$i_p = J_p \cdot \sin(\omega t + \beta) = J_p \cdot \sin \omega t \cdot \cos \varphi + J_p \cdot \cos \omega t \cdot \sin \beta \quad 29)$$

setzen.

Damit dieser Ausdruck mit dem in Gl. 27 gegebenen identisch wird, muss

$$J_p \cdot \cos \beta = \frac{\mathfrak{w}}{0{,}4\,\pi\, n_p} \cdot \Phi_{max} \text{ und } J_p \cdot \sin \beta = \frac{n_s}{n_p} \cdot J_s$$

sein. Dies ergiebt:

$$\sin \beta = \frac{J_s \cdot n_s}{J_p \cdot n_p}, \quad \cos \beta = \frac{\mathfrak{w} \cdot \Phi_{max}}{0{,}4\,\pi\, n_p \cdot J_p}, \quad \tan \beta = \frac{n_s \cdot J_s}{\frac{\mathfrak{w} \cdot \Phi_{max}}{0{,}4\,\pi}} \quad . \; 30)$$

Durch Quadrieren und Addieren der für sin φ und cos φ erhaltenen Werte ergiebt sich:

$$n_p{}^2 \cdot J_p{}^2 = n_s{}^2 \cdot J_s{}^2 + \left(\frac{\mathfrak{w} \cdot \Phi_{max}}{0,4\,\pi}\right)^2 \quad . \quad . \quad . \quad 31)$$

Diese Form zeigt, dass das Produkt $n_p \cdot J_p$ als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes angesehen werden kann, dessen Katheten die sekundären Ampèrewindungen $n_s \cdot J_s$ und die Grösse $\frac{\mathfrak{w} \cdot \Phi_{max}}{0,4\,\pi}$ sind.

Hierauf beruht ein von G. Kapp angegebenes und von Fleming vervollständigtes Verfahren zur graphischen Darstellung der Vorgänge im Transformator. (Vergl. Fig. 137.) Man zieht mit Radien, die in irgend einem Massstabe den Grössen $J_p \cdot n_p$ und $J_s \cdot n_s$ proportional sind, zwei Kreise.

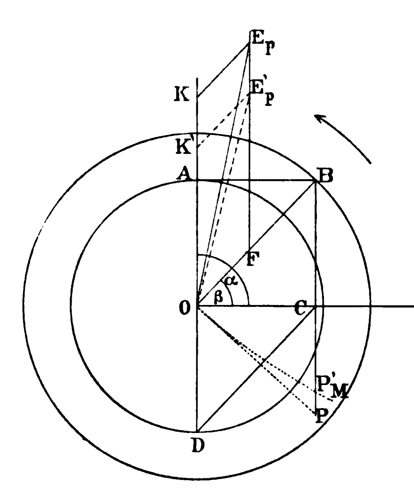


Fig. 137. Graphische Darstellung der Vorgänge im Transformator.

Konstruiert man in irgend einem Punkte A des kleineren Kreises mit dem Radius $J_s \cdot n_s$ die Tangente und verlängert diese, bis sie den grösseren Kreis in B schneidet und vervollständigt das Rechteck OABC, so ist:

$\overline{BC} = J_s \cdot n_s$ und $\overline{OB} = J_p \cdot n_p$, mithin ist:

$$\sin BOC \frac{\overline{BC}}{\overline{OB}} = \frac{J_s \cdot n_s}{J_p \cdot n_p} = \sin \beta.$$

Daraus folgt, dass $BOC = \beta$ der Winkel ist, um den der primäre Strom dem periodisch veränderlichen Magnetfeld in der Phase vorauseilt, und dass:

$$\overline{OC} = \frac{\mathfrak{w} \cdot \Phi_{max}}{0,4\,\pi}$$

eine der Kraftlinienzahl proportionale Grösse ist. Sind im sekundären Stromkreise Strom und EMK in gleicher Phase, was angenähert der Fall ist, wenn der Transformator nur auf induktionsfreie Widerstände arbeitet, so ist die in der sekundären Wickelung induzierte EMK und auch der Strom gerade um 90° gegen die Phase des Magnetfeldes verzögert.

Die Strecken $\overline{OB}$, $\overline{OC}$ und $\overline{OD}$ befinden sich daher hinsichtlich der Phase in den relativen Lagen, die der primäre Strom, das Magnetfeld und der sekundäre Strom gegen einander einnehmen.

Trägt man nun auf OB eine Strecke ab, die der Proportion genügt:

$$\overline{OF} : \overline{OB} = w_p : n_p$$

so ist, da $OB = J_p \cdot n_p$ ist, alsdann:

$$\overline{OF} = w_p \cdot J_p.$$

$\overline{OF}$ ist somit der Spannungsverlust im primären Stromkreis und entspricht einer EMK, die mit dem primären Strome in gleicher Phase ist.

Die in der primären Wickelung von dem veränderlichen Felde induzierte EMK E'_p ist gerade der in der sekundären Wickelung induzierten EMK $w_s J_s$ entgegengesetzt gerichtet.

Es ist nun aber

$$E'_p = \omega \cdot n_p \cdot \Phi_{max},$$

ferner:

$$E_s = \omega \cdot n_s \cdot \Phi_{max} = w_s \cdot J_s$$

folglich:

$$E'_p = \frac{n_p}{n_s} \cdot w_s \cdot J_s.$$

Wir tragen daher in dem Massstab der Volt, der durch die Grösse von $\overline{OF}$ bestimmt ist, in der Richtung von OA

$$\overline{OK} = \frac{n_p}{n_s} \cdot w_s \cdot J_s = E'_p$$

auf. Es ist dies die Komponente der primären EMK, die der Selbstinduktion des Transformators entgegenwirkt.

Vervollständigt man nun das Parallelogramm OFEK, so ist $\overline{OE}$ der Maximalwert der an den Klemmen der primären Wickelung thätigen EMK. α ist der Winkel, um den die Phase dieser EMK der Phase des Magnetfeldes vorauseilt.

Lässt man das Parallelogramm OFEK um O in der Pfeilrichtung rotieren, so stellen die Projektionen von $\overline{OE}$ auf eine Achse OY die Klemmenspannung der primären Wickelung E_p für einen gegebenen Moment t dar.

An diesem Diagramm (Fig. 137) kann man den Einfluss der Änderung der Permeabilität des Eisens, der für grössere Kraftliniendichten nicht vernachlässigt werden kann, veranschaulichen.

Wir denken uns zu dem Zwecke längs der Linie OC die Ampèrewindungen der Erregung und als Ordinaten dazu die Grösse $\omega\, n_p\, \Phi$ abgetragen, die der magnetischen Felddichte proportional ist. Hierdurch sei die Kurve OM entstanden, statt der Geraden OP, die gelten würde, wenn die Permeabilität konstant wäre. Einer Anzahl Ampèrewindungen, die z. B. gleich $\overline{OC}$ wäre, entspricht dann eine induzierte sekundäre EMK $e'_p = \overline{CP'}$, während derselben Anzahl

Ampèrewindungen der Wert OP entsprochen haben würde, wenn die Permeabilität konstant und daher die Felddichte der Anzahl der Ampèrewindungen genau proportional gewesen wäre.

Da $\overline{OP'}$ kleiner als $\overline{OP}$ ist, so muss auch die EMK der Selbstinduktion OK′ kleiner ausfallen als OK. Wir erhalten daher statt des Parallelogrammes OFEK ein kleines Parallelogramm OFE′K′.

Die Abnahme der Grösse μ, der Permeabilität des Eisens bei grösserer Felddichte, vermindert hiernach sowohl die primäre als die sekundäre Spannung und den sekundären Strom. Ausserdem werden aber auch, wie die Figur zeigt, die Phasenunterschiede verkleinert.

Da aber die Abnahme der Permeabilität sich stets nur in den Teilen einer Wechselstromperiode geltend machen wird, in der die Feldstärke sich in der Nähe ihres Maximums befindet, werden die Phasenverkleinerungen und die Verminderungen der EMK sich nur zu diesen Zeitabschnitten geltend machen.

Wenn nun der Stromerzeuger auch eine EMK liefert, die genau nach einer Sinuslinie verläuft, so folgt daraus, so lange induktionsfreie Widerstände die Belastung liefern, dass die zu den Zeiten des Maximums der Feldstärke induzierten Momentanwerte der EMK verhältnismässig geringer ausfallen und geringere Phasenverschiebungen erfahren werden, als die zu den Abschnitten der Wechselstromperiode induzierten, in der die periodisch schwankende Feldstärke gering ist. Es ergiebt sich somit eine Gestaltsänderung der Wechselstromkurven und zwar nicht nur in der sekundären EMK und Stromstärke der Transformatoren, sondern auch rückwirkend in der EMK und Stromstärke des Wechselstromerzeugers der auf Transformatoren arbeitet.

5. Einfluss der magnetischen Streuung.

Bei keinem Transformator ist es möglich, die magnetische Streuung ganz zu vermeiden; selbst bei sorgsamster Anordnung wird es immer eine Anzahl vom primären Strome erzeugte Kraftlinien geben, die sich schliessen, ohne alle Windungen der sekundären Spule zu umfassen.

Bei gut konstruierten Transformatoren, die auf induktionsfreie Widerstände, z. B. Glühlampen arbeiten, beträgt der dadurch veranlasste Spannungsabfall 0,5 bis 2%. Die Streuung wird um so merklicher auftreten, je mehr das Eisen sich seiner Sättigung nähert; die durch das Auftreten einer Streuung verursachte Verminderung der Spannung wird daher erst bei stärkerer Belastung merklich werden.

Eine erhebliche Streuung tritt nur ein, wenn bei über einander liegenden Spulen die innere Spule sehr dick ist, zwischen der äusseren Spule und dem Eisenkern daher ein grosser Zwischenraum ist, oder wenn die Spulen einseitig neben einander oder unsymmetrisch liegen. Am geringsten wird die Streuung, wenn die Spulen ganz symmetrisch zum Kerne angeordnet und über das Eisen verteilt sind, ferner, wenn beide Spulen den Eisenkern möglichst eng umschliessen und über einander übergreifen, oder wenn primäre und sekundäre Windungen in Gruppen geteilt neben einander abwechselnd angeordnet sind.

Die nebenstehende Fig. 138 zeigt z. B. einen Transformator mit rechteckigem Eisenrahmen, bei dem sowohl die primäre als die sekundäre Wickelung in je 4 neben einander liegende Spulen zerlegt ist, die abwechselnd auf einander folgen. Da jede einzelne Spule besonders isoliert werden muss, wird durch solche Anordnungen der Wickelungsraum etwas beschränkt und die Herstellung des Transformators etwas verteuert.

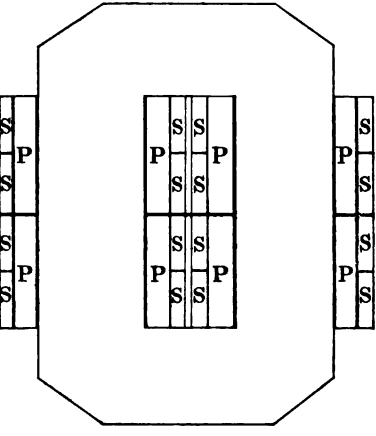


Fig. 138. Kerntransformator.

Wenn alle vom primären Strome erzeugten Kraftlinien sämtliche sekundären Windungen und alle vom sekundären Strome erzeugten Kraftlinien sämtliche primäre Windungen umfassen, so würde der Koëffizient M der gegenseitigen Induktion

$$M = \sqrt{L_p \cdot L_s'} \text{ oder } M^2 = L_p \cdot L_s'$$

sein; wobei L_p und L_s' die Selbstinduktionskoëffizienten der primären und sekundären Wickelung bedeuten.

In Wirklichkeit besteht nun aber zwischen M^2 und $L_p \cdot L_s'$ eine Differenz $\Delta \cdot L_p$

$$\Delta \cdot L_p = M^2 - L_p \cdot L_s' \quad \ldots\ldots \quad 32)$$

Setzt man nun $M^2 = L_p \cdot (L_s)$, wobei (L_s) den Wert des Selbstinduktionskoëffizienten bezeichnet, den die sekundäre Wickelung besitzen müsste, wenn keine Streuung vorhanden wäre, so ist

$$\Delta = \frac{M^2}{L_p} - L_s' = (L_s) - L_s' \quad \ldots\ldots \quad 33)$$

der Unterschied zwischen diesem gedachten und dem wirklichen Selbstinduktionskoëffizienten.

Der Spannungsverlust ε_s in der sekundären Wickelung ist alsdann:

$$\varepsilon_s = J_s \cdot \sqrt{\Delta^2 \omega^2 + w_s'^2} \quad \ldots\ldots \quad 34)$$

wofür man, so lange der Einfluss der Streuung $\Delta \omega$ bei induktionsfreier Belastung gering im Vergleich zu $w^{s'}$ ist, näherungsweise auch schreiben kann:

$$\varepsilon_s = J_s \cdot \left(w_s' + \frac{\Delta \cdot \omega}{2} \right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 35)$$

Zeigt also ein Transformator eine Zunahme des Spannungsabfalles mit wachsender Frequenz ($\omega = 2\pi \sim$), so ist dies ein Zeichen dafür, dass die Streuung des Apparates gross ist und durch zweckmässigere Anordnung der Wickelungen verringert werden muss.

Enthält der ausserhalb des Transformators gelegene Teil des sekundären Stromkreises Selbstinduktion L_s'', so bewirkt die Streuung einen viel stärkeren Spannungsabfall, als bei Belastung durch induktionsfreie Widerstände. Es kommt in der Klammer des Ausdruckes für ε_s (Gl. 35) noch ein weiteres Glied hinzu, das die Grösse $\frac{\Delta}{L_s''}$ enthält und an Grösse $\frac{\Delta \cdot \omega}{2}$ sehr überwiegt.

Bei der Anwesenheit von Selbstinduktion im äusseren Teile des sekundären Stromkreises tritt daher infolge der Streuung ein erheblicher Spannungsabfall ein, der mit steigender Belastung nur wenig wächst (derselbe beträgt in manchen Fällen bis 25%). Will man solche Spannungsänderungen vermeiden, so muss man entweder die Streuung möglichst vermindern oder die Selbstinduktion L''_s der als Belastung dienenden Elektromotoren möglichst gross machen.

Sind längere Kabel an die sekundären Klemmen des Transformators angeschlossen, so macht sich infolge der Kapazität dieser Kabel die Streuung ebenfalls geltend. Bekanntlich wirkt Kapazität wie eine negative Selbstinduktion; an Stelle des Gliedes $\frac{\Delta}{L_s''}$ tritt daher ein negatives Glied $-\Delta \cdot \omega^2 \cdot C$. Bei Anwesenheit von Kapazität im sekundären Stromkreis wird daher die Streuung nicht einen Abfall der Spannung, sondern eine Zunahme der Spannung veranlassen.

6. Der Verlust im Eisen des Transformators.

Im Eisen eines Transformators treten zweierlei Verluste auf, die beide dem Eisengewichte direkt proportional sind. Am wichtigsten sind die unvermeidlichen Verluste durch Hysteresis; von geringerer Bedeutung sind bei genügender Unterteilung des Eisens die Verluste durch Wirbelströme.

Die Verluste durch Hysteresis sind der Anzahl der vollen magnetischen Kreisprozesse und dem Inhalte der von den beiden $\int$ förmigen Kurven eingeschlossenen Fläche proportional; da während jeder Periode des primären Wechselstromes ein solcher Kreisprozess

(vergl. Grundzüge IV, 16, S. 74, und hier Kap. III, Abschn. 5, S. 59) durchlaufen wird, sind die Hysteresisverluste der ersten Potenz der Frequenz direkt proportional.

Die Wechselströme entstehen im Eisen des Transformators ebenso, wie sie in jedem zusammenhängenden Stück eines Leiters auftreten, der in ein wechselndes magnetisches Kraftlinienfeld gebracht wird. Da sie von dem Kraftlinienfelde erzeugt werden, werden sie als geschlossene Kurven die Kraftlinien umschlingen, ähnlich wie das Glied einer Kette die benachbarten Glieder umschlingt, und in der Hauptsache ähnlich verlaufen, wie die in den beiden Wickelungen des Transformators fliessenden Ströme. Da die Wirbelströme induzierte Ströme sind, wird ihre E M K der Frequenz proportional sein.

Die dem Eisen durch die Wirbelströme zugeführte Wärmemenge und der durch diese Ströme verursachte Verlust wird proportional $i^2 \cdot w$ sein, wenn i die effektive Stromstärke und w der scheinbare Leitungswiderstand der Strombahn der Wirbelströme ist. Nun ist aber auch $i = \frac{e}{w}$ und somit $i^2 \cdot w = \frac{e^2}{w}$. Der Wirbelstromverlust ist daher dem Quadrate der E M K direkt und dem scheinbaren Widerstande umgekehrt proportional. Da die E M K der Wirbelströme der Frequenz direkt proportional war, ist somit der durch dieselben veranlasste Verlust der zweiten Potenz der Frequenz direkt und dem scheinbaren Widerstande ihrer Bahn umgekehrt proportional. Der scheinbare Widerstand der Strombahn wird um so kleiner sein, je kleiner die magnetische Induktion B, je grösser der Querschnitt und je höher die Leitungsfähigkeit des Materiales ist.

Die Hysteresisverluste können wir nicht völlig beseitigen, da selbst das beste Eisen noch deutlich diese Erscheinung erkennen lässt; man wird sie nur dadurch vermindern können, dass man eine Eisensorte mit möglichst geringer Hysteresis auswählt.

Die Wirbelstromverluste lassen sich dadurch sehr abschwächen, dass man das Eisen in der Richtung, in der Wirbelströme entstehen würden, aus dünnen Blechen, die von einander isoliert sind, zusammensetzt. In der Richtung, in der die magnetischen Kraftlinien verlaufen, muss aber das Eisen möglichst ununterbrochenen Zusammenhang besitzen, damit eine verhältnismässig grosse Kraftlinienzahl durch eine geringe magnetomotorische Kraft erzeugt wird.

Da beide Eisenverluste dem Volumen des Eisens proportional sind, wird man auch durch Verminderung dieses Volumens diese Verluste verkleinern können.

Es ist das grosse Verdienst von Ch. P. Steinmetz, das Gesetz auf empirischem Wege ermittelt zu haben, nach dem diese Verluste von der magnetischen Induktion B und der Wechselzahl abhängen.

Er hat gefunden, dass, wenn der magnetische Kreisprozess sich von einer maximalen Induktion $+ B_{max}$ sich über Null bis $- B_{max}$ und zurück erstreckt, die während eines solchen Kreisprozesses verbrauchte Energiemenge oder der Gesamtverlust V, der in jeder Gewichtseinheit Eisen entsteht, dargestellt werden kann durch die Formel:

$$V = a \cdot B_{max}{}^{1,6} + \beta \cdot \sim B^2{}_{max} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 36)$$

Erstreckt sich die Änderung der Induktion nur auf die Grenzwerte $+ B'$ und $+ B''$, so ist dieser Verlust

$$V = a\left(\frac{B' - B''}{2}\right)^{1,6} + \beta \cdot \sim \cdot \left(\frac{B' - B''}{2}\right)^2 \quad . \; . \; . \; 37)$$

Hierbei ist, wie immer, $\sim$ die Periodenzahl.

In einer Sekunde ist somit der Verlust einer Eisenmasse, deren Volumen v ist,

$$V = v \cdot \sim \cdot (a \cdot B_{max}{}^{1,6} + \beta \cdot \sim \cdot B^2{}_{max}) \quad . \; . \; . \; 38)$$

Der erste Teil mit dem Koëffizienten a rührt von der Hysteresis, der zweite Teil mit dem Koëffizienten β von den Wirbelströmen her.

Beide Teile hängen von der Grösse der magnetischen Induktion und der Wechselzahl, in geringem Maasse auch von der Form der Kurve der EMK ab.

Wenn man den Eisenkörper aus Blechen zusammensetzt, die nicht dicker als 0,3 bis 0,5 *mm* und gut von einander isoliert sind, so kann man, so lange die Periodenzahl $\sim$ nicht grösser als 75 in einer Sekunde ist, von einer getrennten Berücksichtigung der Wirbelströme absehen und den gesamten Eisenverlust aus einer graphischen Darstellung entnehmen, wie wir eine solche auf S. 65 in Fig. 42 gegeben haben.

Der durch die wechselnde Magnetisierung des Eisens veranlasste Energieverlust bleibt für alle Belastungen des sekundären Stromkreises nahezu gleich, da die Hervorbringung einer nahezu konstanten Klemmenspannung doch immer dieselbe Zahl von Kraftlinien (B_{max}) erfordert. Für Transformatoren, die dauernd an ein Verteilungsnetz angeschlossen und längere Zeiträume hindurch nur wenig belastet sind, muss man daher diese Eisenverluste möglichst gering machen.

7. Die Kupferverluste im Transformator.

Sowohl in der primären, als in der sekundären Wickelung eines Transformators entsteht ein mit der Belastung zunehmender Spannungsverlust dadurch, dass bei zunehmender Belastung beide Stromstärken steigen (vgl. d. Tabelle S. 189) und damit die Spannungsverluste $J_p \cdot w_p$ und $J_s \cdot w_s$ zunehmen. — Während also, wie vorhin

mitgeteilt wurde, die Eisenverluste des Transformators für alle Belastungen dieselben bleiben, nehmen die Kupferverluste mit der Belastung zu.

Streng genommen, müsste bei der Bestimmung der Spannungsverluste statt der Widerstände der beiden Wickelungen w_p und w_s deren Impedanz eingesetzt werden; da diese Impedanzen aber, so lange die Drähte nicht zu dick sind und die Wechselzahl nicht zu hoch ist, nur um wenige Prozent von dem Widerstande abweichen und die Spannungsverluste wiederum nur wenige Prozent der Spannung ausmachen, so kann man bei unserer elementaren Behandlung des Gegenstandes die etwas reichlich bemessenen Widerstände der Wickelungen ohne weiteres der Berechnung der Kupferverluste zu Grunde legen. Ist man genötigt, grössere Kupferquerschnitte zu verwenden (über 5 *mm*), so stellt man die Wickelungen der Transformatoren aus einzelnen Drähten von etwa 2,5 *mm* Dicke her und isoliert die Leitungen durch einen Schellack- oder Ölfarbenanstrich von einander.

Will man erheblichere Spannungsabfälle durch Stromwärme vermeiden, damit die sekundäre Klemmenspannung bei verschiedener Belastung und konstanter primärer Spannung sich möglichst wenig ändert, so muss man die Kupferverluste gering machen.

Der Energieverlust in den Windungen ist den Quadraten der Stromstärken proportional.

Bei Belastung des sekundären Stromkreises mit induktionsfreien Widerständen (z. B. Glühlampen) fällt der sekundäre Strom in der Phase völlig mit der sekundären Klemmenspannung zusammen.

Bei höheren Belastungen kann auch der primäre Strom und die primäre Klemmenspannung als in der Phase zusammen fallend angesehen werden. Bei Leerlauf des Transformators, also bei offenem sekundären Stromkreis, tritt jedoch eine Phasenverschiebung zwischen primärem Strom und Spannung ein; die Verschiebung würde 90^0 betragen, wenn die Magnetisierung des Eisens keine Verluste veranlasste; da aber Hysteresis- und Wirbelstromverluste vorhanden sind, beträgt dieselbe meist zwischen 30^0 und 60^0. Der Leerlaufstrom ist bei gut gebauten Transformatoren ganz gering, meist nur 2 bis 4% von dem Primärstrome bei Vollbelastung.

8. Vorausberechnung des Wirkungsgrades eines gegebenen Transformators für eine bekannte Belastung.

Wir betrachten einen Transformator für 10 Kilowatt mit dem Umsetzungsverhältnis 20, bei dem die Primärspannung 2000 V, die Sekundärspannung rund 100 V sein soll. Bei Vollbelastung soll der Kupferverlust in jeder Wickelung 1%, also 100 Watt, der Verlust

im Eisenkern durchaus 2%, d. i. 200 Watt, betragen. Die Widerstände der Wickelungen ergeben sich daraus angenähert zu:

$$w_p = 4\,\omega, \qquad w_s = 0{,}01\,\omega.$$

Soll der unbelastete Transformator eine sekundäre Klemmenspannung von 100 V geben, und nehmen wir in diesem Falle eine Phasenverschiebung zwischen dem primären Strome und seiner Spannung von 45° an, so ist bei Leerlauf

$$J_p \cdot 2000 \cdot \cos 45 = 200 \qquad J_p = \frac{200}{2000 \cdot \cos 45} = 0{,}14 \text{ A.}$$

Bei Vollbelastung muss in der primären Wickelung

$$W_p = 10\,000 + 200 + 100 + 100 = 10\,400 \text{ Watt,}$$

geleistet werden, damit an den Klemmen der sekundären Wickelung 10 000 Watt zur Verfügung stehen.

Der primäre Strom ist dann bei Vollbelastung $\frac{10\,400}{2000} = 5{,}2$ A.

An den sekundären Klemmen stehen, da je 1% der Spannung in den beiden Wickelungen verloren geht und die Streuung vernachlässigt werden soll, nur noch 100 — 2 = 98 V zu Verfügung.

Der sekundäre Strom beträgt daher:

$$J_s = \frac{10\,000}{98} = 102{,}0 \text{ A.}$$

Der Wirkungsgrad in Prozenten bei Vollbelastung beträgt:

$$G = 100 \cdot \frac{W_s}{W_p} = 100 \cdot \frac{10\,000}{10\,400} = 96{,}1\,\%.$$

Um die Berechnung für halbe Belastung durchzuführen, bestimmen wir zunächst die primäre Stromstärke aus der Leistung und aus der primären Spannung

$$J_p = \frac{5000 + 200 + \text{den unbekannten Kupferverlusten}}{2000},$$

das giebt näherungsweise, wenn wir zunächst die unbekannten Kupferverluste unberücksichtigt lassen:

$$J_p = 2{,}6 \text{ A.}$$

Daraus ergiebt sich angenähert der Energieverlust V_p in der primären Wickelung

$$V_p = w \cdot J_p^2 = 4 \cdot 2{,}6^2 = 27{,}0 \text{ Watt.}$$

Der Spannungsverlust ε_p wäre

$$\varepsilon_p = w \cdot J_p = 4 \cdot 2{,}6 = 10{,}4, \text{ d. i. von 2000 rund } 0{,}5\,\%.$$

Die sekundäre Stromstärke berechnen wir zuerst angenähert aus

der Leistung, gleich der Hälfte der Vollbelastung, d. i. 5000 Watt, und aus der Klemmenspannung

$$J_s = \frac{5000}{100 - 0,5} = \frac{5000}{99,5} = 50,3 \text{ A}.$$

Dies ergiebt an Wattverlust und Spannungsverlust in der sekundären Wickelung:

$W_s = w_s \cdot J_s = 0,01 \cdot 50,3^2 = 25,3$ Watt. $\varepsilon_p = 0,01 \cdot 50,3 = 0,5$ V.

In erster Annäherung beträgt hiernach der Gesamtverlust im Kupfer $27,0 + 25,3 = 52,3$ Watt.

Damit wiederholen wir die Bestimmung der primären Stromstärke und finden:

$$J_p = \frac{5000 + 200 + 52,3}{2000} = \frac{5252,3}{2000} = 2,63 \text{ A}.$$

Der Spannungsverlust ε_p wird:

$$\varepsilon_p = w_p \cdot J_p = 10,3 \text{ V}.$$

Hieraus ergiebt sich nach dem Umsetzungsverhältnis 20 für die sekundäre Wickelung ein Spannungsverlust von $\frac{10,3}{20} = 0,51$ Volt.

Der sekundäre Strom wird:

$$J_s = \frac{5000}{100 - 0,5 - 0,5} = \frac{5000}{99} = 50,5 \text{ A}.$$

und der neu berechnete Spannungsverlust in der sekundären Wickelung:

$$\varepsilon_s = w_s \cdot J_s = 0,01 \times 50,5 = 0,5 \text{ Volt}.$$

Die sekundäre Klemmenspannung wird hiernach bei halber Belastung 99,0 V betragen.

Der Wirkungsgrad in Prozenten wird in diesem Falle:

$$G = 100 \cdot \frac{5000}{5252,3} = 95,2\,\%.$$

9. Der Leerlaufstrom eines Transformators.

Zumal bei Transformatoren, die an Beleuchtungscentralen angeschlossen und unausgesetzt in Betrieb sind, ist es von Wichtigkeit, dass der Leerlaufstrom gering ist, damit in den Tagesstunden und späteren Nachtzeiten, in welchen wenig oder gar keine Lampen brennen, nicht ein beträchtlicher Energieaufwand erforderlich ist.

Der Leerlaufstrom besteht aus zwei Komponenten. Die eine derselben i_M ist der Strom, der zur Erzeugung des periodisch schwankenden Kraftlinienfeldes erforderlich ist. Die EMK dieses Stromes hat aber eine um 90° von der Stromstärke verschiedene Phase, und der erforderliche Energieaufwand ist daher Null. Es ist i_M somit eine wattlose Komponente des Stromes. (Vergl. Kap. I Abschn. 8, S. 17, und Kap. III, Abschn. 9, S. 68.)

Die andere Stromkomponente i_H aber fällt mit der EMK in der Phase zusammen und dient dazu, die Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme zu decken.

Der Leerlauf- oder Erregerstrom i_0 ist daher die Resultante der beiden um 90^0 gegen einander verschobenen Komponenten:

$$i_0 = \sqrt{i^2_M + i^2_H} \quad \ldots\ldots \quad 39)$$

Die Grösse der Komponente i_H ermittelt man aus dem Eisenverlust V_s, den man bei einem zu konstruierenden Transformator kennt, oder bei einem gegebenen Apparate durch Messungen mit einem Wattmeter bestimmt. Es ist

$$i_H = \frac{V_s}{e_p} \quad \ldots\ldots \quad 40)$$

Enthält das magnetische Feld im Eisenkern Φ Kraftlinien und ist der magnetische Widerstand des Kraftlinienweges $\mathfrak{w}$, so wird die erforderliche Stromstärke i_M bestimmt durch den Ausdruck (vergl. Grundz., Kap. V, 3., S. 77)

$$\Phi = \frac{0{,}4\,\pi i n_p}{\mathfrak{w}} \text{ und } \mathfrak{w} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\lambda}{S}$$

nun ist $\frac{\Phi}{S} = B$, gleich der magnetischen Induktion, μ die Permeabilität des Eisens und λ die Länge des Kraftlinienweges im Eisen, n_p die Anzahl der Windungen. Daraus folgt

$$i_M = \frac{B \cdot \lambda \cdot 0{,}4 \cdot \pi}{\mu \cdot n_p} \quad \ldots\ldots \quad 41)$$

Da wir B_{max} in Rechnung zu ziehen haben, müssen wir den um den Faktor $\sqrt{2}$ grösseren Wert $J_M = i_M \cdot \sqrt{2}$ benutzen und erhalten:

$$J_M = \frac{B_{max} \cdot \lambda}{\mu \cdot n_p \cdot 1{,}78} = \frac{B_{max}}{1{,}78 \cdot n_p} \cdot \frac{\lambda}{\mu} \quad \ldots \quad 42)$$

Diese Formel gilt, wenn die Kraftlinien ununterbrochen nur im Eisen verlaufen, also keine Stossfugen vorhanden sind. Sind Stossfugen im Eisenkern vorhanden, oder ist überhaupt ein Luftzwischenraum von der Länge δ von den Kraftlinien zu durchlaufen, so nimmt, da μ für Luft bekanntlich $= 1$ ist, der Ausdruck die Form an:

$$J_M = \frac{B_{max}}{n_p \cdot 1{,}78} \left(\frac{\lambda}{\mu} + \delta \right) \quad \ldots\ldots \quad 43)$$

Da die von den Stossfugen berührende Grösse δ im Vergleiche zu $\frac{\lambda}{\mu}$ stets sehr gross ist,[1]) folgt daraus, dass man bei Trans-

[1]) μ ist in Transformatoren etwa von der Grösse 2000.

formatoren, die einen geringen Magnetisierungsstrom haben sollen, Stossfugen thunlichst vermeiden und den Kraftlinienweg λ im Eisen möglichst klein machen muss.

10. Einrichtung der Transformatoren im allgemeinen.

Die in der Praxis verwendeten Transformatoren zerfallen in zwei Hauptgruppen: erstens die Kerntransformatoren, bei denen ein eiserner Kern ganz oder teilweise von den Kupferwickelungen umgeben ist, und zweitens die Manteltransformatoren, bei denen die Wickelung zum grösseren Teile von dem Eisen umgeben wird.[1])

Als Beispiel der Kerntransformatoren mag Fig. 139 dienen. Um einen aus dünnen Eisenblechen gebildeten Rahmen J sind die primären und sekundären Spulen C C entweder, wie hier gezeichnet, über einander liegend oder in Abteilungen neben einander liegend angeordnet. Auf die äussere Gestalt des Kernes, ob quadratisch, rechteckig oder rund, und ebenso auf die Querschnittform kommt wenig an, doch ist überall die dem Kreisring am nächsten kommende Form die beste.

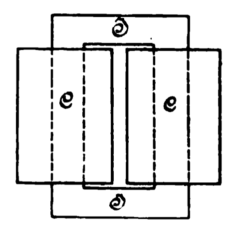


Fig. 139. Kerntransformator.

Drehstromtransformatoren besitzen drei Kerne, die durch gemeinschaftliche Joche verbunden sind, und diese Kerne sind entweder, wie bei derartigen Apparaten von Siemens & Halske, Schuckert etc., um je 120⁰ gegen einander versetzt (vergl. Fig. 146), oder die drei Kerne sind neben einander angeordnet, wie bei den Drehstromtransformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, der Maschinenfabrik Oerlikon und anderen.

Die Manteltype wird durch Fig. 140 veranschaulicht. Bei dieser stellt J den aus Eisenblechen bestehenden Eisenkörper und C die sekundäre und primäre Spule dar, die über einander liegen.

An sich wäre es am besten, wenn man die Eisenbleche in der Form des Kernes ausstanzte und hierauf die Spulen um den fertig geformten Eisenkörper herum wickelte. Dies geschieht wohl auch bei kleinen Transformatoren. Für grössere Modelle aber ist dieses Verfahren kaum anwendbar, weil man dann die Spulen nur von Hand wickeln könnte und für jede Windung den ganzen Drahtbund durch den engen Hohlraum des Eisens durchstecken müsste.

---

[1]) Die Unterscheidung in Kerntransformatoren und Manteltransformatoren rührt von G. Kapp her.

Um die Spulen für sich auf der Drehbank wickeln, gut isolieren und auf ihre Isolation vor der Aufbringung prüfen zu können, muss man Unterbrechungen im Eisen zulassen. Bei den grösseren Kerntransformatoren, besonders bei den Drehstromtransformatoren, lässt man daher auch Stossfugen zu, wie dies z. B. Fig. 148 erkennen lässt. Dann können die fertig gewickelten Spulen einfach übergeschoben werden.

Bei kleineren Transformatoren überhaupt und bei denen der Manteltype ganz besonders sucht man eigentliche Stossfugen zu vermeiden. Man baut zu dem Zwecke den Eisenkörper in die fertig gewickelten Spulen ein. Aus gut ausgeführten Eisenblechtafeln von 0,3—0,5 *mm* Dicke, deren eine Seite mit ganz dünnem Seidenpapier beklebt ist, stanzt man die Bleche in der gewünschten Form aus. An der schmalsten Stelle wird das Blech durchschnitten und der überstehende Lappen zurückgebogen (vergl. Fig. 141), so dass man den Streifen über die Spulen schieben kann. Dann werden die umgebogenen Streifen zurückgebogen und das Blech geglättet. Die nächste Blechtafel legt man aber nun entgegengesetzt ein, so dass das zusammenhängende Stück die Schnittstellen a_1 a_2 des vorigen Bleches überdeckt und fährt so fort, bis der Eisenkörper fertig ist (vergl. Fig. 142). Durch den Druck einer hydraulischen Presse presst man die Tafeln zusammen und umgiebt sie hierauf mit einem isolierten Rahmen, der sie zusammenhält.

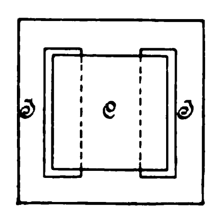


Fig. 140.
Manteltransformator.

Wegen der grossen Fläche, auf der sich zwei benachbarte Tafeln berühren, brauchen die Kraftlinien nicht den schmalen Luftraum der Schnittstellen a_1 a_2 zu überschreiten, sondern sie haben die Möglichkeit, in den grossen Berührungsflächen überzugehen. Der magnetische Widerstand des so hergestellten Eisenkörpers ist daher nur wenig grösser, als er sein würde, wenn die einzelnen Tafeln nicht durchschnitten worden wären.

Bei Kerntransformatoren kann man Stossfugen dadurch vermeiden, dass man jede Lage aus zwei rechtwinkligen Stücken zusammensetzt und über die Stossstelle der unteren Schicht die ununterbrochenen Teile der nächsten Schicht legt.

Sind, wie bei Fig. 148, S. 218, Stossfugen unvermeidlich, so muss man, um an denselben Wirbelströme zu vermeiden, in die Fuge noch ein dünnes Stück Isolationsmaterial (Papier) einlegen.

Über die Form und die Abmessung des Eisenkörpers giebt es keine bestimmten Vorschriften; doch hat sich herausgestellt, dass

der Wirkungsgrad am günstigsten ausfällt, wenn für die normale Belastung die Verluste im Eisen den Verlusten im Kupfer ungefähr gleich sind.

Für Transformatoren, die behufs Speisung von Glühlampen dauernd an Beleuchtungscentralen angeschlossen werden sollen, macht man die Eisenverluste möglichst klein. Transformatoren, durch die Elektromotoren mit Strom versorgt werden sollen, werden etwas reichlicher bemessen, als der voraussichtlichen Höchstleistung entspricht, und so eingerichtet, dass der Spannungsabfall bei Belastung mit Selbstinduktion möglichst gering wird.

Den geringeren Nutzeffekt bei kleiner Belastung und den etwas höheren Preis der Transformatoren nimmt man dabei mit in Kauf.

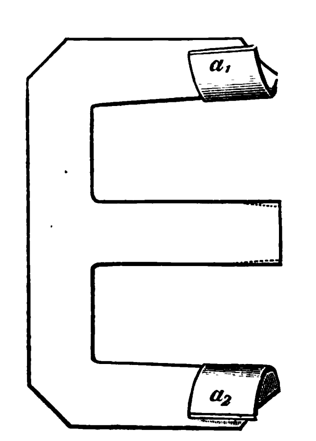


Fig. 141. Transformatorblech der Manteltype.

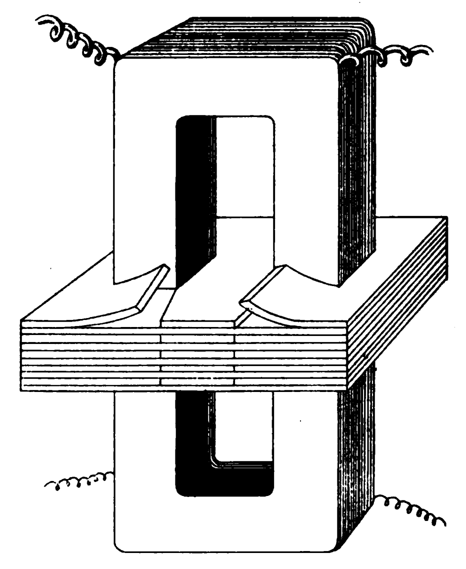


Fig. 142. Aufbau des Eisenkörpers eines Manteltransformators.

Die Vorzüge der Kerntransformatoren sind verhältnismässig geringes Eisengewicht und leichte Zugänglichkeit der Spulen. Ihr Nachteil sind grosses Kupfergewicht und beträchtliche Länge des Kraftlinienweges.

Die Manteltransformatoren zeichnen sich aus durch die Kürze des Kraftlinienweges und geringeres Kupfergewicht, dafür wird aber das Eisengewicht grösser, und die Spulen sind, weil sie zum grossen Teil im Eisen eingebettet sind, schwer zugänglich.

11. Vorausberechnung eines Manteltransformators.

Es soll ein Manteltransformator für 10 Kilowatt, mit einem Umsetzungsverhältnis 20 und einer Primärspannung von 2000 V konstruiert werden. Bei Vollbelastung soll der Kupferverlust gleich dem Eisenverluste sein und jeder 200 Watt betragen. Der Kupferverlust soll sich auf die primäre und sekundäre Wickelung gleichmässig verteilen. Der primäre Strom muss also bei Vollbelastung eine Energiemenge von 10000 + 400 Watt abgeben. Die Frequenz $\sim$ soll 50 in jeder Sekunde betragen. Die Induktion im Eisen soll $B_{max.} = 5000$ betragen. Den Eisenquerschnitt des Kernes wollen wir zu 144 *qcm* annehmen.

Dann ist die gesamte Kraftlinienzahl $\Phi_{max} = 144 \cdot 5000 = 720000$. Daraus findet man nach der Formel für die effektive EMK in der sekundären Wickelung

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \sim \cdot n_p \cdot \Phi \,.\, 10^8$$

die Zahl der sekundären Windungen

$$n_p = \frac{E_s \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot \sim \cdot \Phi} = \frac{100 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 720000} = 62{,}6 = 63.$$

Bei 63 Windungen findet man $E_s = 100{,}7$ V statt 100 V. Da infolge des Spannungsabfalles das Umsetzungverhältnis die Neigung hat, um etwa 2 % abzunehmen (vergl. die Tabelle S. 189), so wird man die Zahl der primären Windungen nicht genau 20 mal so gross, d. h. 1260 Windungen, sondern etwa 2 % weniger, nämlich $n_p = 1235$ Windungen wählen.

Dadurch wird bei Leerlauf die sekundäre Spannung erhöht und wird: $\quad 100{,}7 : x = 1235 : 1260 \qquad x = 102{,}7$ Volt.

Man kann nunmehr auch angenähert die primäre und sekundäre Stromstärke bestimmen. Die primäre Stromstärke, abgesehen vom Leerlaufstrom, wird bei Vollbelastung

$$J_p = \frac{10000 + 400}{2000} = 5{,}2 \text{ A.}$$

Die sekundäre Stromstärke wird in erster Annäherung

$$J_s = \frac{10000}{100} = 100 \text{ A sein.}$$

Aus den festgesetzten Verlusten lässt sich der Widerstand der Wickelungen angenähert ermitteln:

$$J_p{}^2 \cdot n_p = V_p \qquad w_p = \frac{V_p}{J_p{}^2} = \frac{100}{27{,}0} = 3{,}7\ \omega$$

$$J_s{}^2 \cdot w_s = V_s \qquad w_s = \frac{V_s}{J_s{}^2} = \frac{100}{10000} = 0{,}01\ \omega.$$

Aus dem festgesetzten Eisenverlust von 200 Watt lässt sich nun auch das Gewicht der Eisenmasse bestimmen, denn es ist:

Gewicht $\times$ Eisenverlust für 1 *kg* = 200 Watt.

Nach dem auf S. 65 wiedergegebenen Diagramm ist bei einer

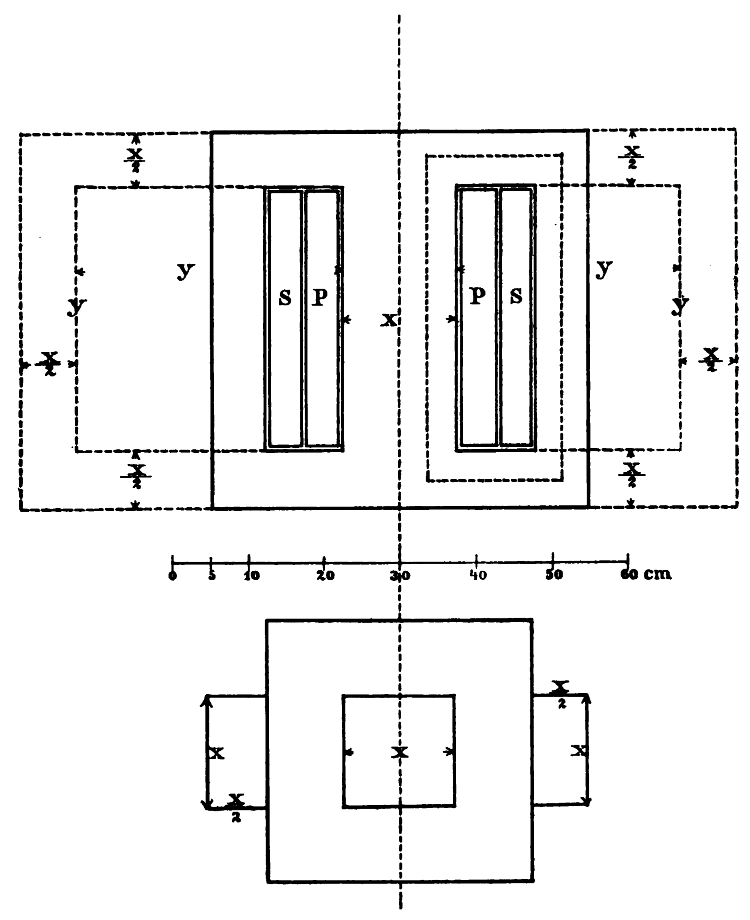


Fig. 143. Bestimmung der Abmessungen eines Manteltransformators.

Induktion von B_{max} = 5000 und einer Wechselzahl $\sim$ = 50 der Wattverlust für 1 *kg* Eisen etwa 2 Watt.

Daraus folgt für das Eisengewicht 200 *kg*. Um daraus das Volumen des Eisenkörpers zu bestimmen, müssen wir berücksichtigen, dass das Volumen nur ungefähr zu $^8/_{10}$ vom Eisen und zu $^2/_{10}$ von dem zwischen den Blechen liegenden Papier ausgefüllt wird. Das

spezifische Gewicht von Eisenblech kann rund zu 8 angenommen werden. Wir erhalten also das Volumen des

$$\text{Eisenkörpers} = \frac{200}{8 \cdot 0,8} = 31\ cdm = 31000\ ccm.$$

Nunmehr wollen wir die Gestalt des Eisenkörpers feststellen und wählen zunächst, ohne Rücksicht darauf, ob diese Form sehr zweckmässig ist, behufs Vereinfachung der Rechnung, die nebengezeichnete Form. (Fig. 143, äussere gestrichelte Linie.) Dann ist das

$$\text{Eisenvolumen} = 2\left[(x+y)^2 - y^2\right] x = 2\,x^2\,(x + 2\,y).$$

Da wir den Eisenquerschnitt des Kernes zu 144 *qcm* angenommen hatten, wird der Querschnitt x^2 des quadratischen Kernes wegen der Isolation im Verhältnis von 10 : 8 grösser zu nehmen sein als 144 *qcm*. Wir finden daher

$$x^2 = \frac{10}{8} \cdot 144 = 180\ qcm \qquad x = 13,4\ cm.$$

Nunmehr kann y aus obiger Gleichung bestimmt werden.

$$\mathfrak{B} = 2\,x^3 + 4\,x^2\,y \qquad y = \frac{\frac{\mathfrak{B}}{2} - x^3}{2\,x^2} = \frac{15500 - 2405}{2 \cdot 180} = 36,3\ cm.$$

Nimmt man versuchsweise die mittlere Länge einer primären Windung (4 mal die Seite eines Quadrates) zu $4 \times 20\ cm = 80\ cm$ an, so findet man den Querschnitt des Drahtes aus der Formel:[1])

$$w_p = \frac{K \cdot l}{q} \text{ oder } q = \frac{K \cdot l}{w_p} = \frac{0,02 \cdot 0,80 \cdot 1235}{3,7} = 5,34\ qmm.$$

Daraus ergiebt sich die Drahtdicke $d_p = 2,6\ mm$ und besponnen $d'_p = 3,2\ mm$.

Die Höhe eines der Eisenfenster betrug 363 *mm*; rechnet man für die Isolation und sonstige Zwischenräume 11 *mm* ab, so bleiben 352 *mm*. Dann kommen in eine Lage 352/3,2 = 110 Windungen und es sind 1235 : 110 = 11 Lagen nötig. 11 Lagen ergeben eine Dicke der primären Wickelung von $11 \times 3,2 = 35$ *mm*. Nimmt man auch innen in der Spule für Isolation und Spielraum 12 *mm*, so ist die Weite der innersten Wickelung 134 + 12 + 3,2 = 149.

Der äussere Durchmesser der Spule wird: $149 + 2 \times 35 - 3,2 = 216$ *mm*. Der mittlere Durchmesser würde somit $\frac{216 + 149}{2} = 182$ *mm*, statt wie angenommen 200 *mm*.

---

[1]) Für das spezifische Leitungsvermögen K der erwärmten Kupferdrähte ist die Zahl 0,02 benutzt.

Wir wiederholen jetzt die Rechnung für die mittlere Weite einer Windung von 180 *mm*. Dann wäre die Länge der primären Wickelung 1235 × 4 × 18.

Wir erhielten für q

$$q = \frac{0{,}02 \times 4 \times 0{,}17 \times 1235}{3{,}7} = 4{,}54 \; qmm.$$

Daraus ergiebt sich $d_p = 2{,}4$ *mm* und die Dicke des übersponnenen Drahtes zu 3,0 *mm*.

Das ergiebt auf 351 *mm* Höhe des Fensters 351 : 3 = 117 Windungen und 1235 : 117 = 11 Lagen, wobei auf die elfte Lage nur 85 Windungen kommen.

Nunmehr ist die Weite der innersten quadratischen Windung

$$134 + 12 + 3 = 149$$

und die der äussersten

$$149 + 2 \times 33 - 3 = 212,$$

die der mittleren somit 181 *mm*; das aber ist eine befriedigende Übereinstimmung. Die Beanspruchung des Kupfers wird ungefähr 5,2 : 4,54 = 1,1 A für 1 *qmm*.

Die primäre Wickelung wird somit mit Draht von 2,4 *mm* ausgeführt; es werden 4 × 181 × 1235 = 89414 *cm* rund 895 *m* Draht dazu nötig sein. Die Dicke der sekundären Spule würde 3,3 *cm* betragen.

Nimmt man für die Dicke der äusseren Isolation beiderseitig 5 *mm*, so wird die äussere Dicke der primären Spule:

$$134 + 12 + 10 + 2 \times 33 = 222 \; mm.$$

Nunmehr bestimmen wir die Abmessungen der sekundären Spule. Wir denken uns dieselbe aussen um die Primärspule herum gelegt, weil sich der dicke Draht in weitere Windungen besser wickeln lässt, und bei dieser Anordnung die Drähte, die hohe Spannung führen, in der Hauptsache durch den Eisenkörper und die andere Spule verdeckt werden, und weil endlich bei dieser Art der Anordnung die magnetische Streuung so gering wird, dass man auf sie keine besondere Rücksicht zu nehmen braucht. Rechnen wir nun für besondere Isolation der sekundären Spule, Spielraum etc. nochmals beiderseitig 5 *mm*, so wird die innere Weite der innersten Windung der Sekundärspule 232 *mm*. Bei der gleichen Beanspruchung des Kupfers mit 1,1 A für 1 *qmm* würde der Querschnitt des Sekundärdrahtes 100 : 1,1 = 91 *qmm*, das gäbe einen Draht von 10,7 *mm* Dicke. Statt dessen verwenden wir 6fach parallel geschalteten Draht von 4,4 *mm*, dessen Kupferquerschnitt 6 × 15,2 = 91,2 *qmm* ist. Dieser Draht ist mit der Isolation 5,1 *mm* dick. Die Höhe des Fensters im Eisenkörper, Isolation abgerechnet, betrug 352 *mm*, demnach enthält eine Lage 352 : 5,1 = 352/30,6 = 11 Windungen 6fach parallelen Drahtes.

Da es 63 sekundäre Windungen geben soll, macht das 6 Lagen von 5,1 *mm* dickem Draht. Demnach wird die sekundäre Spule ungefähr eine Dicke von $6 \times 5{,}1 = 30{,}6$ *mm* haben.

Die innerste Windung hätte eine Weite von $232 + 5{,}1 = 237$, die äusserste Windung hätte eine Weite von $232 + 2 \times 30{,}6 - 5{,}1 = 288$ *mm*. Darnach wird die mittlere Länge einer Windung $262 \times 4 = 1048$ *mm*. Die Länge der sekundären Wickelung wäre darnach $1{,}048 \times 63$ *m*. Der Querschnitt der sekundären Bewickelung würde dann:

$$q = \frac{0{,}02 \times 1{,}048 \times 63}{0{,}01} = 131 \; qmm.$$

Dies gäbe bei 6fach parallelem Draht für den Querschnitt eines Drahtes 22 *qm*, dessen Dicke 5,3 *mm* nackt und 6 *mm* besponnen ist. Von solchem 6fach parallelen Drahte gehen, bei einer für die niedrigere Spannung geringeren Dicke der Isolation, in das Fenster des Eisenkörpers $360/36 = 10$ neben einander. Dies giebt 6 Lagen von einer Dicke von 36 *mm*.

Darnach würde die Weite der innersten Windung $232 + 6 = 238$ und die Weite der äussersten Windung $232 + 2 \times 36 - 6 = 298$ und darnach die mittlere Seitenlänge einer sekundären Windung 264 *mm*.

Die Übereinstimmung ist so befriedigend, dass wir mit $264 \; mm \times 4 \times 63 = 66528 \; mm = 67 \; m$ die mittlere Länge der sekundären Wickelung annehmen können.

Die äussere Weite der sekundären Windung betrüge somit, weil 3 Windungen des 6fach parallelen Drahtes hinzukommen, ungefähr 300 *mm* und mit Rücksicht auf die Isolation 310 *mm*. Wir tragen nunmehr in die Zeichnung die Spulen ein.

Es zeigt sich, dass die Fenster des Eisenkörpers nicht ganz zur Hälfte durch die Wickelungen ausgefüllt werden würden. Man verkürzt deshalb die Fenster so, dass die Wickelung mit reichlicher Isolation gerade bequem darin Platz finden kann, aber den Hohlraum völlig ausfüllt. Dann fallen, wie die Fig. 143 zeigt, 4 Eisenstücke weg mit einem Volumen von:

$$4{,}19 \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 4{,}19 \cdot 13{,}4 \cdot \frac{13{,}4}{2} = 6824 \, ccm.$$

Das Eisengewicht wird dadurch um $6{,}8 \times 8 = 54{,}4$ *kg* vermindert und beträgt nunmehr nur noch $200 - 54 = 146$ *kg*. Dass hiermit auch der Verlust durch Hysteresis und Wirbelströme in demselben Verhältnisse also von 200 auf 146 Watt erniedrigt wird, ist nur ein Vorteil.

Um nunmehr den Leerlaufstrom zu finden, bestimmen wir zunächst den wattlosen Magnetisierungsstrom.

Die mittlere Länge des Kraftlinienweges im Eisen finden wir aus der Fig. 143 (punktierte Linie) zu

$$2 \times 43{,}5 + 2 \times 16{,}7 = 120 \; cm.$$

Stossfugen sind nicht vorhanden, demnach gilt zur Berechnung von i_M die Formel:

$$i_M = \frac{B \cdot l}{1{,}78 \cdot n \cdot \mu} = \frac{5000 \cdot 120}{1{,}78 \cdot 1235 \cdot 2350} = 0{,}116 \text{ A.}$$

Den Wert für die Permeabilität μ haben wir dabei dem Kappschen Diagramm, Fig. 40, S. 62 entnommen.

Die Wattkomponente des Leerlaufstromes bestimmen wir aus dem Verluste im Eisen durch Hysteresis und Wirbelstrom (146 Watt) und der primären Klemmenspannung (2000)

$$i_H = \frac{146}{2000} = 0{,}073 \text{ A.}$$

Der Leerlaufstrom i_0 selbst setzt sich aus diesen beiden Komponenten zusammen, die einen Winkel von 90^0 mit einander einschliessen, und man findet:

$$i_0 = \sqrt{i_M{}^2 + i_H{}^2} = \sqrt{0{,}12^2 + 0{,}07^2} = 0{,}14 \text{A.}$$

Wir berechnen nun Spannungsverlust und Wirkungsgrad bei Vollbelastung und bei halber Belastung.

Bei Vollbelastung ist der primäre Strom gleich Gesamteffekt durch Klemmenspannung, also

$$J = \frac{10000 + 146 + 100 + 100}{2000} = \frac{10346}{2000} = 5{,}17 \text{ A}$$

und unter Hinzufügung des Leerlaufstromes

$$J' = 5{,}3 \text{ A.}$$

Der Widerstand n_p der primären Wickelung, bestehend aus 895 *m* Draht von 2,4 *mm*, beträgt (den spezifischen Leitungswiderstand des ungefähr 65^0 warmen Kupfers zu 0,02 angenommen):

$$n_p = \frac{0{,}02 \cdot 895}{4{,}52} = 3{,}96 \; \omega.$$

Dann ist der Spannungsverlust in der primären Leitung $3{,}96 \cdot 5{,}3 = 21{,}0$ Volt, der Effektverlust $v_p = 3{,}96 \cdot 5{,}3^2 = 111$ Watt. Der Widerstand w_s der sekundären Wickelung, bestehend aus 67 *m* von 6fach parallelem Drahte von 5,3 *mm* Dicke ist:

$$w_s = \frac{0{,}02 \cdot 67}{6 \cdot 22{,}1} = 0{,}01 \; \omega.$$

Der sekundäre Strom J_s bei Vollbelastung war angenähert 100 A, der Spannungsabfall somit 1 Volt und der Effektverlust 100 Watt.

Der reduzierte Spannungsabfall in der primären Spule ist $21 \cdot \frac{63}{1285} = 1{,}07$ V, der Gesamtspannungsverlust somit $1{,}07 + 1 =$ 2,1 Volt. Die sekundäre Klemmenspannung bei Vollbelastung ist somit (vergl. S. 200)

$$102{,}7 - 2{,}1 = 100{,}5 \text{ Volt.}$$

Der Wirkungsgrad G ist:

$$G = 100 \cdot \frac{10000}{10396} = 96{,}0\,\%.$$

Das Kupfergewicht der Bewickelung beträgt

für die primäre Spule 36,2 *kg*
für die sekundäre Spule 76,4 *kg* } Gesamt-Kupfergewicht 112,6 *kg*.

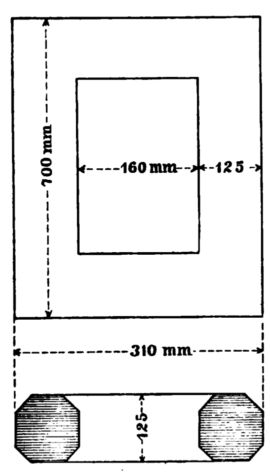


Fig. 144. Eisengestell eines Kerntransformators.

Das Eisengewicht war 146 *kg*, das Gewicht des aktiven Materials für 1 Kilowatt beträgt somit rund 26 *kg*, was nach den praktischen Erfahrungen für Transformatoren dieser Art durchaus angemessen erscheint.

Als ausstrahlende Oberflächen können wir bei einem Manteltransformator nur die obere Fläche und die nicht von der Wickelung bedeckte Eisenfläche der Seitenflächen in Anrechnung bringen.

Die rechten und linken Seitenflächen sind Rechtecke von der Breite x und der Höhe $x + y$, ihr Inhalt also ist $2\,(x^2 + xy)$. Die Deckfläche ist ein Rechteck mit den Seiten x und 48 *cm*. Die von der Wickelung nicht bedeckten Vorder- und Hinterflächen sind $48\,(x + y) - y \cdot 34$.

Die Gesamtoberfläche ist somit:

$$2x\,(x + y) + x \cdot 48 + 2 \cdot 48\,(x + y) - 2y \cdot 34 =$$
$$2 \cdot 13{,}4\,(13{,}4 + 36{,}3) + 13{,}4 \times 48 + 2 \cdot 48\,(13{,}4 + 36{,}3) -$$
$$2 \cdot 36{,}3 \cdot 34 = 4415 \text{ qcm.}$$

Dies giebt ungefähr 30 *qcm* Oberfläche für 1 Watt Kernverlust und das ist erfahrungsmässig ein zulässiger Betrag. Bei Dauerbetrieb wird sich der Transformator nach Versuchen, die Kapp[1]) angestellt hat, um ungefähr 60° C über die Umgebung erwärmen, wenn er in einen durchlöcherten Eisenkasten eingeschlossen wird.

[1]) Kapp, Transformatoren, S. 43.

12. Berechnung eines Kerntransformators.[1])

Für eine primäre Betriebsspannung von 2000 Volt und eine sekundäre Spannung von 100 Volt, soll ein Transformator für 110 Ampère sekundäre Stromstärke, also von einer Gesamtleistung von 11 Kilowatt konstruiert werden. Wechselzahl $\sim = 50$. Das Eisengestell soll als gegeben vorausgesetzt werden und nebenstehende Form haben. (Vergl. Fig. 144.) Die Kerne sind von quadratischem Querschnitte, Quadratseite = 12,5 *cm*, die Ecken der Quadrate sind um 20 *mm* abgeschrägt, damit die Spulen näher an den Kernen liegen. Dann beträgt der Querschnitt: $12{,}5^2 - 2 \cdot 2^2 = 148$ *qcm*. Rechnet man davon 12% ab für die Isolation zwischen den Eisenblechen, so ist der wirkliche Eisenquerschnitt rund 130 *qcm*.

Nimmt man die magnetische Induktion B = 5060 für 1 *qcm* an, so führt der Kraftlinienstrom $\Phi_{max} = 130 \cdot 5060 = 658000$ Kraftlinien.

Die Zahl der sekundären Windungen bestimmt man aus:

$$e = 4{,}44 \cdot \sim \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \cdot n_s \qquad n_s = \frac{e}{4{,}44 \cdot \sim \cdot \Phi \cdot 10^{-8}}.$$

Nimmt man den Spannungsabfall bei Vollbelastung zu 2,5 an, so ist e = 102,5 Volt und

$$n_s = \frac{102{,}5}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 658000 \cdot 10^{-8}} = 70.$$

Die primäre Wickelung würde aus n_s

$$n_s = 70 \cdot \frac{2000}{102{,}5} = 1364$$

Windungen bestehen.

Jeder der beiden Kerne bekommt somit 682 primäre und 35 sekundäre Windungen.

Die Dicke des zu verwendenden Drahtes ergiebt sich daraus, dass der Verlust durch Stromwärme im Ganzen 174 Watt, für jede Wickelung also ungefähr 87 Watt betragen soll.

Die sekundäre Stromstärke beträgt $i_s = 110$ Ampère. Daraus findet man den Widerstand der primären Wickelung $w_p = 0{,}0068$ Ohm.

Den Widerstand der primären Wickelung findet man aus der primären Stromstärke $i_p = 5{,}7$ Ampère und dem Verluste durch Stromwärme zu $w_p = 2{,}8$ Ohm.

Rechnet man für Isolation oben und unten und den Spielraum zusammen 35 *mm* ab, so ergiebt sich die vertikale Höhe der Wickelung zu $45{,}0 - 3{,}5 = 41{,}5$ *cm*.

---

[1]) Nach G. Kapp.

Den Durchmesser der innersten Windung nehmen wir mit Rücksicht auf Spielraum und eine Isolation von mindestens 5 *mm* Dicke zu 17,0 *cm*.

Damit etwas Spielraum zwischen den beiden äusseren Spulen bleibt, wählen wir den Durchmesser der äusseren Spule zu 26,4 *mm*.

Es bleibt dann $\frac{26{,}4 - 17{,}0}{2} = 4{,}7$ *cm* für beide Spulen. Davon gehen noch 5 *mm* für Isolation und 4 *mm* für Spielraum zwischen beiden Spulen ab, man hat somit 3,8 *cm* verfügbar für die Wickelung.

Dies giebt dann folgende Wickelungen: Sekundäre Spule (innen) 2 Lagen (eine zu 18, eine zu 17 Windungen) bestehend aus 6 *mm* $\times$ 20 *mm* rechteckigem Draht (besponnen auf 7 $\times$ 21); primäre Spule (aussen) 6 Lagen zu 112 und eine zu 10 Windungen bestehend aus Draht von 3,1 *mm* Dicke ($3^2/_8$ *mm* besponnen).

Die sekundäre Wickelung wird rund 14, die primäre 24 *mm* tief.

Der Verlust durch Hysteresis wird, vorzügliches Blech vorausgesetzt, 163 Watt betragen.

Der Wirkungsgrad bei Vollbelastung ergiebt sich zu 97 %.

Die abkühlende Oberfläche wird annähernd gleich 12000 *qcm*. Dies giebt für 1 Watt in Wärme umgesetzte Energie 36 *qcm* ausstrahlende Fläche.

Das Eisengewicht beträgt . . . 180 *kg*
das Kupfergewicht beträgt . . . 112 *kg*.

Das Gesamtgewicht des wirksamen Materiales beträgt 292 *kg* oder 26,6 *kg* für 1 Kilowatt, das ist fast genau ebensoviel, wie beim vorigen Beispiel.

13. Beschreibung ausgeführter Transformatoren.

Hinsichtlich der praktischen Ausführung der Transformatoren weichen die Konstruktionen der verschiedenen Firmen nicht unerheblich von einander ab. Wesentliche Abweichungen ergeben sich auch je nach dem Zwecke, für den diese Apparate bestimmt sind.

Ein charakteristisches Beispiel eines Kerntransformators für einphasigen Wechselstrom giebt nebenstehender Aufriss und Grundriss (Fig. 145) einer Konstruktion von Siemens & Halske.

Die quadratischen Eisenkerne sind von runden Spulen umgeben, und zwar ist jede der beiden Hochspannungsspulen in vier von einander durch isolierende Zwischenschichten getrennte Abteilungen, die andere Wickelung jedes Kernes in zwei Abteilungen zerlegt. Falls eine Abteilung beschädigt wird, kann das obere Joch von den Kernen abgeschraubt und die betreffende Spule ausgewechselt werden. In den Luftzwischenräumen zwischen den Kernen und inneren Spulen-

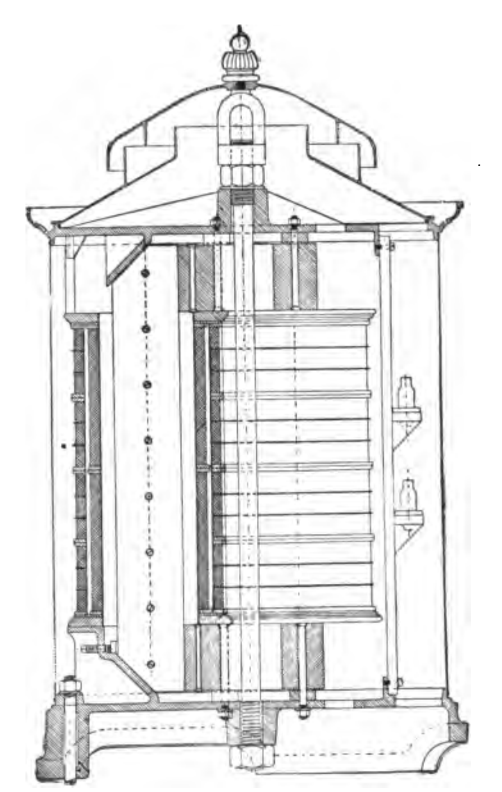
wänden entstehen infolge der Erwärmung aufsteigende Luftströme, durch die eine kräftige Abkühlung bewirkt wird.

Durch die im Boden der Grundplatte angebrachten Löcher werden die Drähte zu- und abgeführt und tritt Luft zu. Die Anschlussklemmen und Bleisicherungen werden auf einem Brette angebracht, das an der Grund- und Deckplatte befestigt wird.

Der ganze Apparat ist aussen von einem Blechmantel umgeben, und an der Stelle, an der die Klemmen sich befinden, hat das Gehäuse eine Thür, die für gewöhnlich geschlossen gehalten wird, im Bedarfsfalle jedoch geöffnet werden kann.

Das Dach des Gehäuses ist so konstruiert, dass die erwärmte Luft leicht entweichen, aber keine Nässe von aussen eindringen kann.

Im Prinzipe ganz ähnlich konstruiert sind die Transformatoren für dreiphasigen Wechselstrom oder Drehstrom von **Siemens & Halske**, die in Fig. 146 in Grund- und Aufriss dargestellt sind. Die Abbildung Fig. 147 zeigt einen solchen Apparat in einem Schutzgehäuse aus durchlöchertem Blech, wie er in gedeckten, vor den Unbilden des Wetters völlig geschützten



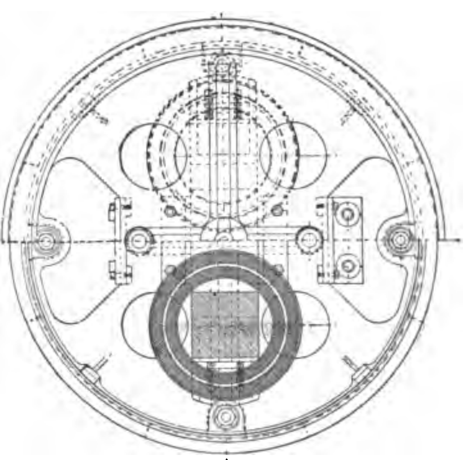
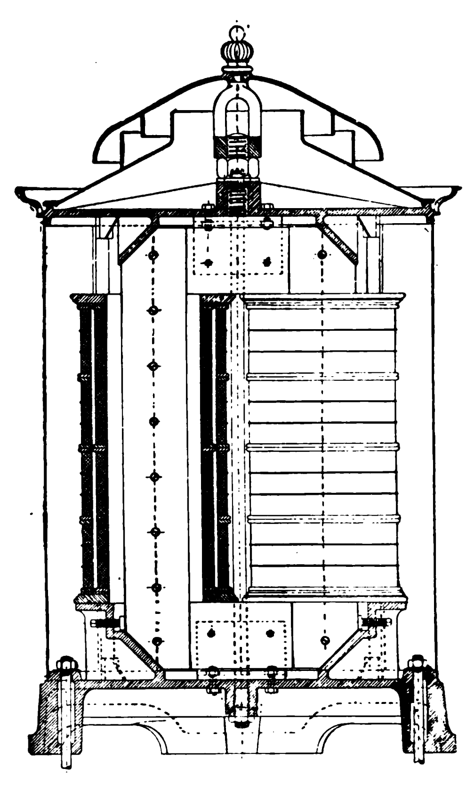


Fig. 145.
Wechselstromtransformator von Siemens & Halske.



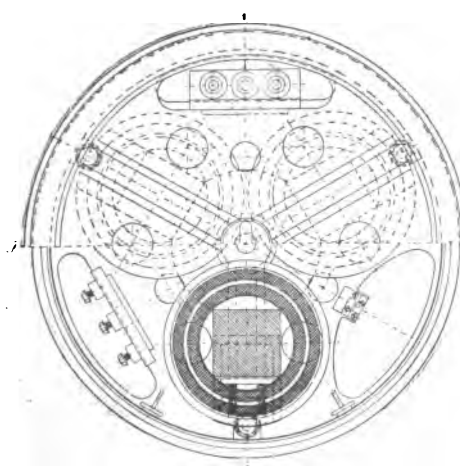


Fig. 146.
Drehstromtransformator von Siemens & Halske.

Räumen verwendet wird. Die Klemmen a, b, c dienen dazu, den Hochspannungsstrom den äusseren Spulen zuzuführen, während A, B, C die Klemmen für die aus dickem Draht hergestellten, innen gelegenen Sekundärspulen sind.

In Fig. 148 a ist ein kleinerer Drehstromtransformator abgebildet, und Fig. 148 b zeigt, in welcher Weise diese Apparate geschützt werden, wenn die Aufstellung derselben im Freien erfolgt. Fig. 148 a lässt ausserdem deutlich erkennen, dass die Deckplatten mit Stossfugen an die Kerne der Transformatoren angesetzt sind und dass die Wickelungen durch Bleisicherungen gegen zu starke Erhitzungen geschützt werden.

Man sieht, dass ein Drehstromtransformator aus drei durch gemeinsame Endplatten oben und unten mit einander verbundenen, um 120° gegen einander versetzten Eisenkernen besteht. Jeder Kern hat eine Hochspannungs- und eine Niederspannungswickelung.

Da die Phase der drei in den Leitungen fliessenden Wechselströme um je 60° verschieden ist, entstehen in den drei Kernen der Transformatoren drei verschiedene Kraftlinien-

felder. Die in je einem Kerne erzeugten Kraftlinienfelder schliessen sich alsdann durch die beiden anderen Kerne.[1])

Sowohl die drei Wickelungen der Hochspannungsleitungen, als die drei Wickelungen, die Strom von geringer Spannung führen, sind je an einem Ende mit einander verbunden, während die je drei anderen Enden an die äusseren Leitungen angeschlossen sind.



Fig. 147. Drehstromtransformator von Siemens & Halske in einem Schutzgehäuse für Innenräume.

Ein Drehstromtransformator hat daher drei Hochspannungs- und drei Niederspannungsklemmen.

Man kann selbstverständlich die Umformung der drei einen

[1]) Die magnetische Verkettung der drei Kraftlinienströme ist zuerst von dem Chefelektriker der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft von v. Dobrowolski angegeben worden.

Drehstrom bildenden verketteten Wechselströme auch in drei getrennten Transformatoren bewerkstelligen. Dies bedingt jedoch einen erheblichen Mehraufwand an Eisen.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin giebt ihren Kerntransformatoren insofern eine andere Anordnung, als die Eisenkerne horizontal liegen, und der Raum innerhalb der Spulen fast vollständig durch diese Kerne ausgefüllt wird. Die aus Eisenblechen hergestellten Joche, durch die die Kerne verbunden werden,



Fig. 148 a. Fig. 148 b.
Kleinerer Drehstromtransformator von Siemens & Halske.

sind in gusseiserne Ständer eingelassen, die an das Fussgestell angegossen sind. Um an der Stossfuge zwischen Kernen und Joch den Querschnitt zu vergrössern, durch den die Kraftlinien übergehen können, sind die Kerne mit Einschnitten versehen, in welche die Vorsprünge der Joche gerade hineinpassen.

Die Abbildung 149 zeigt einen Drehstromtransformator dieser Firma im fertigen Zustande nach Entfernung des Schutzgehäuses, wie solche in Strassburg i. E. bereits in Verwendung sind und auch bei den grossartigen Kraftübertragungswerken in Rheinfelden benutzt werden sollen.

Die parallele Anordnung der drei Kerne hat den Vorteil, dass sich nach Lösung der rechts und links am Gestell sichtbaren Schrauben mit langem Bolzen ein Kern nach dem anderen samt daran sitzenden Spulen herausnehmen lässt.

Um die Streuung auf einen sehr geringen Betrag zu bringen, sind primäre und sekundäre Wickelung zum Teil über einander, zum

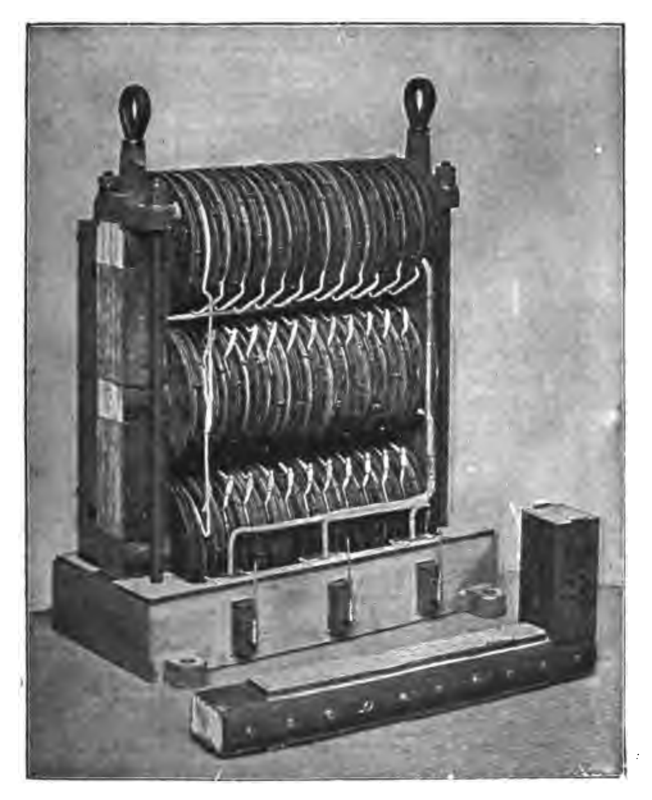


Fig. 149. Drehstromtransformator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Teil in vielen Abteilungen abwechselnd neben einander angeordnet. Dadurch ist der grosse Vorteil erreicht, dass auch bei Belastung mit Elektromotoren, deren Ströme grosse Phasenverschiebung zeigen, der hierdurch veranlasste Spannungsabfall höchstens 4% beträgt.

Durch Verwendung eines neuen Isolationsmateriales, des Kunstglimmers oder Mikanits, das die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft selbst herstellt, kann eine so treffliche Isolation erreicht

werden, dass solche Transformatoren selbst für Spannungen von 25000 Volt brauchbar bleiben.

Für den in Fig. 149 abgebildeten Transformator hat uns die **Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft** gütiger Weise folgende Angaben zur Verfügung gestellt. Spannung zwischen zwei Leitungen, primär 2750 V., sekundär 120 V. Zahl der Perioden 50. Beide Wickelungen Sternschaltung. Primäre Wickelung: 6 hinter einander geschaltete Spulen auf jedem Kerne, jede Spule 273 Windungen, 13 neben einander, 21 Lagen über einander, aus Draht von 2,5 *mm* Dicke (3 *mm* besp.). Drahtlänge per Spule 173 *m*. Kupfergewicht per Spule 7,8 *kg*. Sekundäre (Niederspannungs)-Wickelung: 7 parallel geschaltete Spulen auf jedem Kerne. 72 Windungen in jeder Spule, 6 neben einander, 12 Lagen über einander. Zur Wickelung dient rechteckiger Draht 4×5 *mm* (isoliert 5×6), hochkant gestellt. Drahtlänge per Spule 45 *m*. Kupfergewicht per Spule 7,5 *kg*. Querschnitt der Sammelschienen 70 *qmm*.

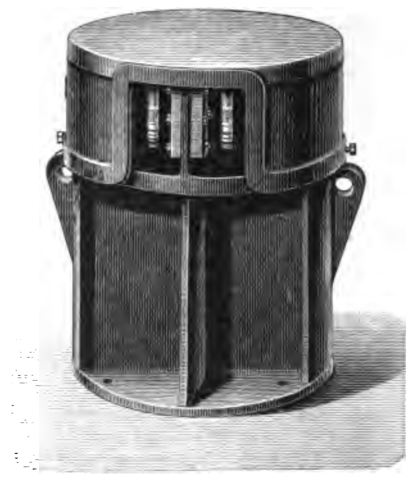


Fig. 151.





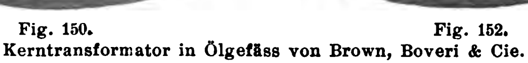


Fig. 150. Fig. 152.
Kerntransformator in Ölgefäss von Brown, Boveri & Cie.

Die Figur zeigt auf der uns zugewendeten Seite die drei Hochspannungsklemmen. Die drei Klemmen für den sekundären Strom befinden sich auf der Rückseite.

Vorn vor dem Apparate liegt ein von den Spulen und der Isolation entblösster Eisenkern. Die Abbildung lässt deutlich erkennen, in welcher Weise die Eisenbleche durch Schrauben und Metallstreifen zusammengehalten werden.

Denken wir uns von einem solchen Drehstromtransformator, wie ihn Fig. 149 darstellt, einen Kern mit seinen Spulen weg, so erhalten wir einen gewöhnlichen Wechselstromtransformator.

Früher wurden Transformatoren für sehr hohe Spannungen in Kästen eingesetzt, die mit Öl gefüllt waren. Das Öl führt zwar die Wärme besser ab, als Luft, wenn in beiden Fällen der Kasten völlig geschlossen ist; man kann daher Öltransformatoren stärker beanspruchen, das Öl bleibt aber viel länger warm und Ausbesserungen an einem in Öl befindlichen Transformator sind eine höchst unsaubere und unangenehme Arbeit. Man wendet daher neuerdings die Ölisolation nur noch bei manchen Apparaten an, die im Freien oder in feuchten Räumen aufgestellt werden sollen.

Die nächsten drei Abbildungen, Fig. 150, 151 und 152, stellen einen Kerntransformator in einem gusseisernen Kasten mit Ölfüllung dar, wie solche von Brown, Boveri & Cie. in Baden (Schweiz) und Frankfurt a. M. hergestellt werden. Fig. 150 zeigt den Apparat mit geschlossener Hülle, bei Fig. 151 ist der Deckel gedreht, so dass die ausschaltbaren Bleisicherungen sichtbar sind. In der folgenden Abbildung (Fig. 152) endlich ist der Transformator aus dem Schutzkasten ziemlich vollständig herausgehoben, so dass man die Anordnung seiner Teile sehen kann. — Der Verschluss ist ein so zuverlässiger, dass derartige Apparate ohne jeden weiteren Schutz dauernd im Freien aufgestellt werden können.

Für einphasigen Wechselstrom benutzt Oerlikon den in Fig. 153 dargestellten Manteltransformator mit langem Kern, cylindrischer Wickelung und schmalem Mantel. Um die Gestalt des Querschnittes des inneren Kernes der Kreisform möglichst zu nähern, wird die Breite der Eisenbleche nach aussen hin geringer. Die Anordnung der Spulen, die auf Cylinder von Papiermasse gewickelt sind, kann aus der Abbildung gut ersehen werden. Der nicht von den Spulen umfasste Teil des Eisenkörpers ist in ein gusseisernes Gehäuse eingebettet. Die äusseren Seiten der Spulen werden durch zwei durchlöcherte Bleche vor Beschädigungen geschützt.

Bei einem für eine Leistung von 20 Kilowatt bestimmten Transformator, der von 1000 auf 100 Volt umsetzt, besteht die primäre Wickelung aus 450 Windungen eines Drahtes von 5,3 *mm* (5,8 *mm*)

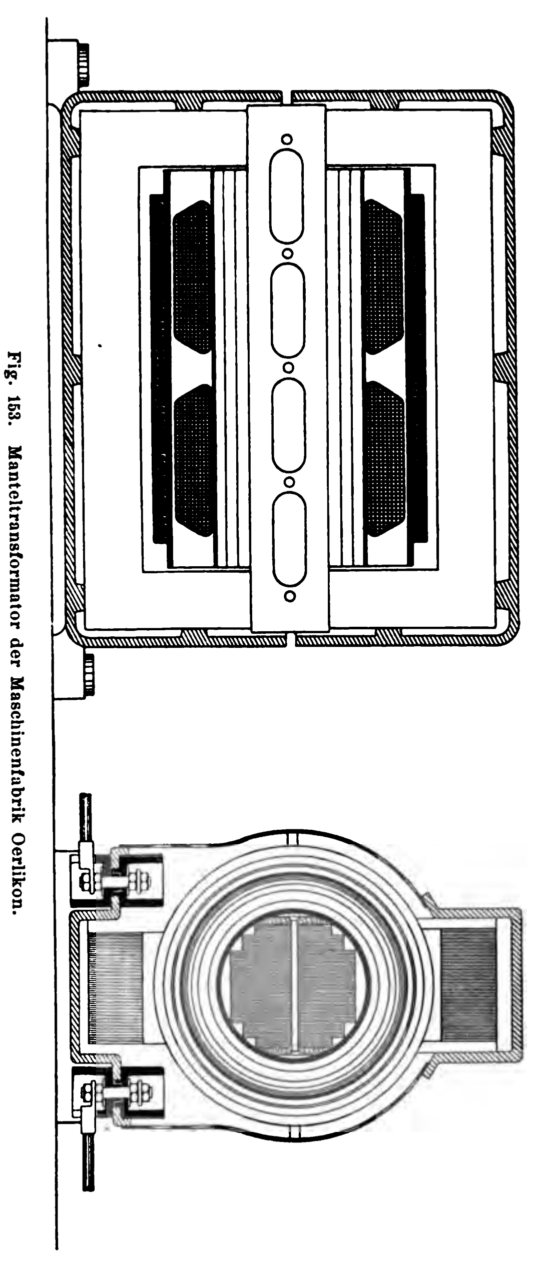


Fig. 153. Manteltransformator der Maschinenfabrik Oerlikon.

Dicke. Die sekundäre Wickelung ist aus zwei parallel geschalteten Wickelungen gebildet, deren jede aus 9,5 × 10 *mm* (10,5 × 11 *mm*) Kupfer von nahezu quadratischem Querschnitt angefertigt ist, und 23 Windungen besitzt. Das Kupfergewicht der primären Wickelung beträgt 63 *kg*, das der sekundären 86 *kg*.

Denkt man sich von einem derartigen Transformator, wie wir ihn eben beschrieben haben, den oberen Teil des Eisenkörpers weggeschnitten, so kommt man auf eine einfache Form, die eine Mittelstellung zwischen den Kern- und der Manteltype annimmt.

Die Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden (Schweiz) benutzt solche Apparate (vgl. Fig. 153) sowohl für einphasigen Wechselstrom, als auch für Leistungen unter 20 Kilowatt, je drei derselben für Drehstrom.

Der magnetische Stromkreis derselben besteht aus einem nahezu cylindrischen Kern, der mit seinen Enden

auf einem in Form eines langgestreckten U konstruierten Joche aufliegt. Kern und Joch sind aus isolierten dünnen Eisenblechen zusammengesetzt, welche für den Kern durch Bolzen, für das Joch durch das Gestell zusammengehalten werden.

Der Kern ist an seinen Enden etwas eingeschnitten, um die Berührungsfläche mit den Jochblechen zu vergrössern und mithin den magnetischen Widerstand des Gestelles und mit ihm die Leerlaufsstromstärke zu verkleinern.



Fig. 154. Wechselstromtransformator von Brown, Boveri & Cie. in seine Bestandteile zerlegt.

Die Spulen sind einzeln hergestellt und auf aus Pressspahn und Glimmer gefertigte Cylinder gewickelt. Sie werden ineinander geschoben, so dass sie voneinander und vom Kerne durch die ca. 6 *mm* dicken Pressspahncylinder getrennt und isoliert sind. Vor mechanischer Beschädigung werden die fertig montierten Transformator-

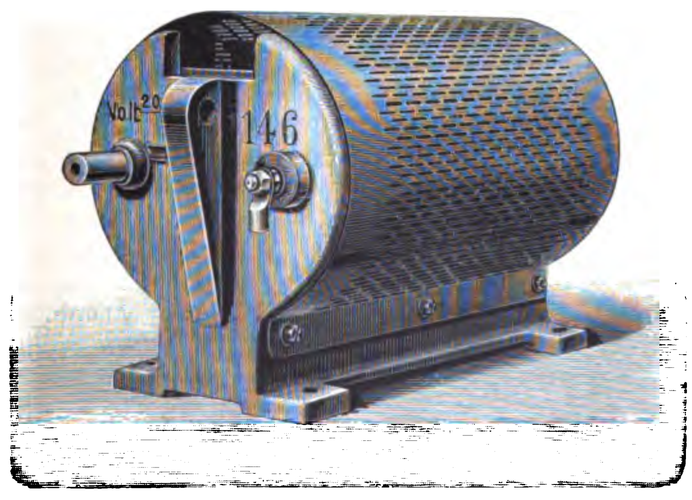


Fig. 155. Halbmanteltransformator von Brown, Boveri & Cie. im Schutzgehäuse.

spulen durch ein am Gestelle befestigtes durchlöchertes Schutzblech geschützt.

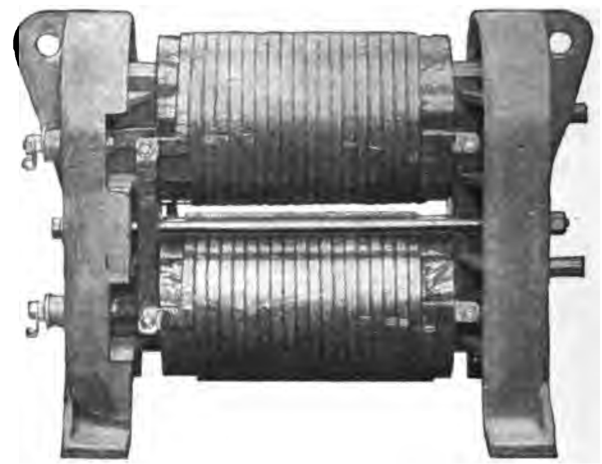


Fig. 156. Kerntransformator von Brown, Boveri & Cie.

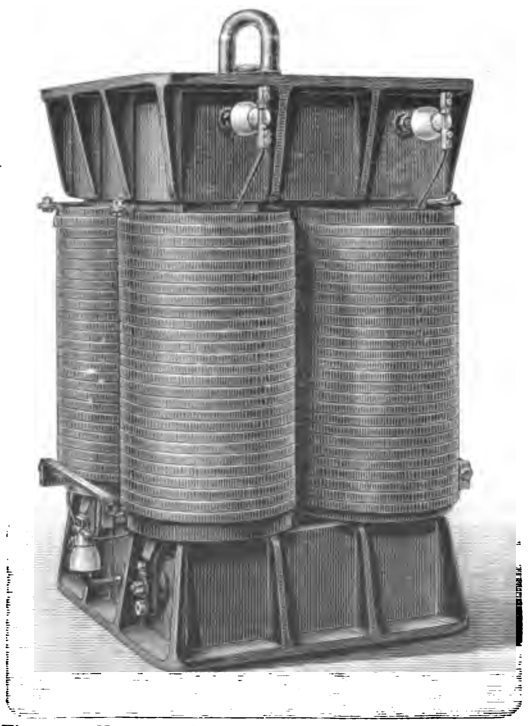


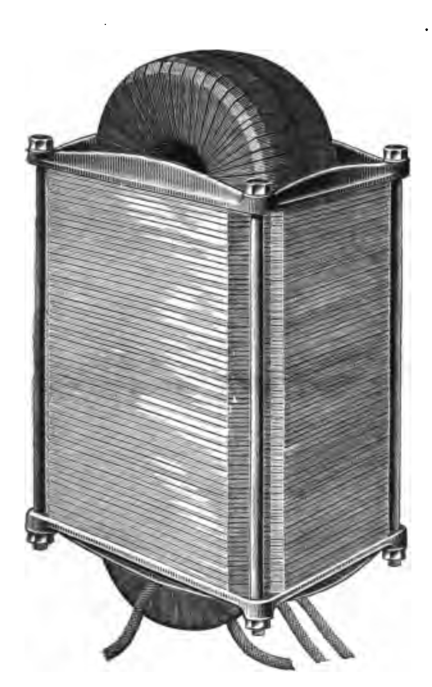
Fig. 157. Kerntransformator für verkettete Zweiphasenströme von Brown, Boveri & Cie.

Die Anschlussklemmen sind an den Endstücken des Gestelles angebracht und zwar so, dass das eine Endstück die beiden Klemmen der einen, das andere diejenigen der anderen Spule trägt. (Vergl. Fig. 155.)

Für trockene Innenräume verwendet dieselbe Firma aber auch Wechselstromtransformatoren mit horizontaler Anordnung der Kerne. (Vgl. Fig. 156.) Der durchlöcherte Blechmantel ist weggenommen, um die Anordnung der Teile besser sichtbar zu machen.

Für grössere Leistungen oder für Umsetzung von verketteten Zweiphasenströmen wird der in Fig. 157 dargestellte Kerntransformator verwendet.

Man ersieht sofort, dass die starke Ströme führende Sekundärspule sich aussen befindet und aus isoliertem Kupferband, nicht aus Draht, hergestellt ist. Als Träger für die Hochspannungszuführungen dienen Porzellanisolatoren.



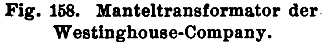


Fig. 158. Manteltransformator der Westinghouse-Company.



Fig. 160. Drehstromtransformator der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co.

Für Drehstrom benutzen Brown, Boveri & Cie. Transformatoren mit drei in einer Ebene liegenden, parallelen Eisenkernen, ähnlich der in Fig. 149 abgebildeten Form.

Um auch von der Einrichtung und Ausstattung der Manteltransformatoren eine deutliche Vorstellung zu geben, teilen wir in Fig. 158 die Abbildung einer amerikanischen Konstruktion mit, des Stanley-Westinghouse Transformators, nach Entfernung des gusseisernen Schutzkastens.

Die Eisenbleche werden durch eiserne Rahmen zusammengehalten. Die Wickelung, die oben und unten aus dem Eisenmantel

herausragt, ist mit Isolierband umgeben, um eine Beschädigung derselben zu verhindern.

Derartige Transformatoren werden bei Verteilungsnetzen mit oberirdischer Stromzuführung mit auf den Masten angebracht, durch welche die Hochspannungsleitungen getragen werden. Diese Apparate befinden sich in gusseisernen Schutzkästen mit abnehmbarem Deckel. Die an die Klemmen der sekundären Wickelung angeschlossenen Verbrauchsleitungen werden von da aus den Verwendungsstellen zugeführt.

Auch die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals

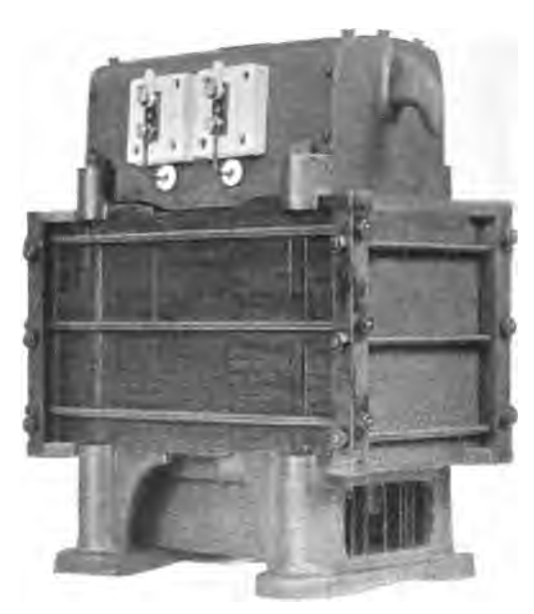


Fig. 159. Manteltransformator der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co.

Schuckert & Co. in Nürnberg verwendet für einphasigen Wechselstrom Manteltransformatoren. Einen derartigen Apparat stellt Fig. 159 dar. Die aus dem Eisenkörper herausragenden Teile der Wickelung sind durch aufgesetzte gusseiserne Hauben vollständig vor Beschädigungen geschützt; auf der oberen Haube ist ein Holzbrett befestigt, das die Klemmen und Bleisicherungen trägt. Durch Schraubenbolzen werden diese Hauben miteinander verbunden und die Bleche, die den Eisenkörper bilden, zusammengepresst.

Für Drehstromtransformatoren benutzt die vorgenannte Firma Konstruktionen nach der Kerntype, die den früher beschriebenen und abgebildeten Apparaten dieser Art ähnlich sind. (Vergl. Fig. 160.)

Die Wickelungen bestehen aus einer sehr grossen Zahl einzelner Spulen, die sorgsam von einander isoliert und derart angeordnet sind, dass die magnetische Streuung auf einen sehr geringfügigen Betrag zurückgeführt wird.

Die durch ihre grossartigen Kraftübertragungsanlagen rühmlichst bekannte Maschinenfabrik Oerlikon verwendet in Drehstromanlagen Kerntransformatoren mit aufrecht stehenden Kernen und ordnet die Kerne entweder unter Winkeln von 120° an, ähnlich wie wir dies in Fig. 146 abgebildet haben, oder sie legt, wie die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, die Achsen der drei Kerne parallel in eine Ebene. (Vergl. Fig. 149.)

14. Drosselspulen und Transformatoren mit offenem magnetischen Kreis.

Die Vorschaltung oder Parallelschaltung induktiver Widerstände bietet bei der Anwendung von Wechselströmen eine so wesentliche Ersparnis an Energie im Vergleiche zum Gebrauche induktionsloser Widerstände, dass man zumeist in Wechselstromanlagen an Stelle der Beruhigungswiderstände vor Bogenlampen oder bei hinter einander geschalteten Lampen an Stelle von mechanischen Kurzschlusseinrichtungen zu den Lampen parallel geschaltete Widerstände mit Selbstinduktion mit grossem Vorteile verwendet. [1])

Man fasst solche Einrichtungen unter dem Namen Drosselspulen zusammen.

Da bei der Ermittelung ihrer Abmessungen ähnliche Gesichtspunkte in Frage kommen, wie bei der Vorherberechnung der Transformatoren, so wollen wir dieselben hier kurz mit betrachten.

Bekanntlich brennen Bogenlampen nur dann ganz ruhig, wenn sie mit einer merklich höheren Spannung betrieben werden, und der über die Lampenspannung hinausgehende Teil der Spannung auf andere Weise durch vorgeschaltete Widerstände oder in Glühlampen verbraucht wird.

Bei vorgeschalteten induktionsfreien Widerständen ist der hierdurch entstehende Energieverlust gleich dem Produkte aus Stromstärke und der im Widerstande verbrauchten Spannung.

Bei Wechselströmen macht sich, wenn man Widerstände mit Selbstinduktion vorschaltet, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung geltend, und der verbrauchte Effekt kann erheblich vermindert werden.

Die Phasenverschiebung wird um so erheblicher sein, je stärker die Selbstinduktion ist; diese ist aber bekanntlich dem Quadrate der Windungszahl proportional.

---

[1]) Man vergl. auch Kap. II, Abschn. 5, S. 29 u. f.

Man benutzt meist magnetische Stromkreise mit erheblichen Luftzwischenräumen. Dann kann ohne grossen Fehler der magnetische Widerstand des Kraftlinienweges im Eisen gegen den Widerstand dieses Luftweges vernachlässigt werden, weil die Permeabilität der Luft ($\mu = 1$) ja 1000—2000 mal geringer als die des Eisens ist.

a) Drosselspulen mit Lampen in Hintereinanderschaltung.

Wir wollen die Behandlung eines solchen Falles an einem Beispiele darthun.

In einem Wechselstromkreise von 50 Volt und 50 Perioden soll eine Bogenlampe von 12 A betrieben werden. Dann fordert die Lampe etwa 30 V Klemmenspannung. Wollte man die 20 Volt in einem gewöhnlichen, induktionsfreien Vorschaltwiderstand verbrauchen, so würden 20 . 12 = 240 Watt in jeder Sekunde nutzlos in Wärme umgewandelt werden. Schaltet man aber statt desselben eine Drosselspule ein, so ist, wie wir schon früher (Kap. II, Abschn. 5., S. 29) gezeigt haben, der Energieverlust viel geringer.

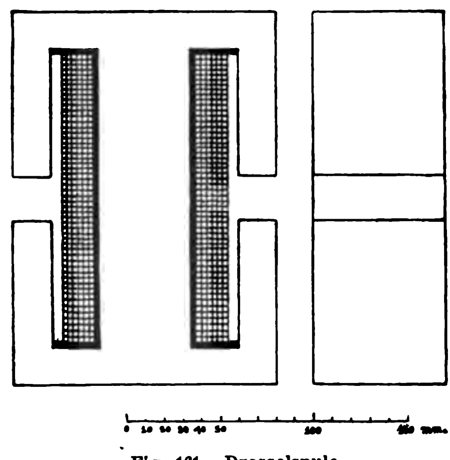


Fig. 161. Drosselspule.

Die Spannung an den Enden der Spule müsste

$$\sqrt{50^2 - 30^2} = 40 \text{ V}$$

sein. Mit Rücksicht auf den Spannungsverlust in der Bewickelung wollen wir 37 V annehmen. Wir wählen den in Fig. 161 abgebildeten, aus isolierten Blechen hergestellten Eisenkern, machen den Schlitz 7,5 *cm* breit und wählen die Induktion B = 4000 Kraftlinien für 1 *qcm*.

Der Querschnitt des in der Spule enthaltenen Eisenkörpers ($\frac{1}{10}$ für die Papierzwischenlagen abgerechnet) ist:

$$f_1 = 0{,}9 \times 7 \times 4{,}8 = 30 \; qcm.$$

Dann ist die Feldstärke $\Phi = 4000 \cdot 30 = 120000$ Linien.

Nunmehr ermitteln wir die Anzahl der erforderlichen Windungen. Nach der Gleichung (S. 185, Gl. 6)

$$e = 4{,}44 \sim \Phi \cdot n \cdot 10^{-8}$$

ergiebt sich die Zahl der erforderlichen Windungen zu:

$$n = \frac{e}{4{,}44 \sim \Phi \cdot 10^{-8}} = \frac{37}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 120000 \cdot 10^{-8}} = 139.$$

Der Strom kann ermittelt werden aus der magnetomotorischen Kraft, diese aus der Kraftlinienzahl und dem magnetischen Widerstande.

Der magnetische Widerstand $\mathfrak{w}$ der Luftschicht ist:

$$\mathfrak{w} = \frac{\delta}{f}.$$

Für f setzen wir, weil nicht nur die Oberfläche des Schlitzes an der Aussendung von Kraftlinien teil nimmt,

$$f = f' + \frac{\delta \cdot b}{2},$$

wo f' der Inhalt einer Endfläche eines solchen Lappens und b die Breite des Schlitzes ist.

Es ist nun $f' = 7 \cdot 2 \cdot 0{,}9 = 12{,}6$ *qcm*, folglich:

$$f = 12{,}6 + \frac{7{,}5 \cdot 7}{2} = 38{,}8 \text{ qcm}$$

und

$$\mathfrak{w} = \frac{7{,}5}{38{,}8} = 0{,}2.$$

Die magnetomotorische Kraft M muss dann sein:

$$M = \Phi \cdot \mathfrak{w} = 120000 \cdot 0{,}2 = 24000$$

und daraus die Stromstärke

$$J_0 = \frac{0{,}8 \times 24000}{\sqrt{2} \cdot 139} = 11{,}7 \text{ A}.$$

Da wir den Spannungsverlust in der Spule zu 3 Volt angenommen haben, muss der Verlust im Kupfer rund: $11{,}7 \times 3 = 35$ Watt betragen.

Hierzu kommt noch der Verlust im Eisenkörper. Das Volumen desselben beträgt ungefähr 1150 *ccm*, sein Gewicht

somit

$$\frac{1150 \cdot 8}{1000} = 9{,}2 \text{ kg}.$$

Nach dem auf S. 65, Fig. 42, dargestellten Diagramm beträgt bei 50 Perioden für $B = 4000$ der Verlust in 1 *cbdm* Eisen 10 Watt. Der Verlust im Eisen ist demnach $1{,}15 \times 0{,}8 \times 10 = 9{,}2$ Watt.

Der Gesamtverlust in der Drosselspule beträgt somit nur $35 + 9{,}2 = 42$ Watt, demnach wenig mehr als $\frac{1}{6}$ von dem, den wir erhalten hätten (240 Watt), wenn ein induktionsfreier Vorschaltwiderstand angewendet worden wäre.

b) Drosselspulen parallel zu den Lampen.

Wir wählen dazu als Beispiel eine 25 kerzige Glühlampe, die bei 23,5 Volt Spannung 80 Watt verbraucht.[1]) Die Periodenzahl des Wechselstromes sei wieder 50.

Parallel zur Lampe sei eine Drosselspule geschaltet, die denselben Eisenkörper besitzt, den wir vorher verwendet haben. (Vergl. Fig. 161.)

Die Induktion im Eisenkörper wählen wir zunächst gering B = 600. Dann ist die Kraftlinienzahl 18000.

Hieraus folgt die Windungszahl

$$n = \frac{23,5}{4,44 \cdot 50 \cdot 18000 \cdot 10^{-8}} = 588.$$

Die magnetomotorische Kraft M ist:

$$M = \Phi \cdot \mathfrak{w} = 18000 \cdot 0,2 = 3600.$$

Der Magnetisierungsstrom in der Wickelung ist demnach:

$$J_M = \frac{0,8 \times 3600}{\sqrt{2} \times 588} = 3,46 \text{ A}.$$

Rechnen wir den Gesamtverlust in Spulenwickelung und Kern zu 20 Watt, so ist bei 23,5 V der hierzu nötige Gesamtnutzstrom, dessen Phase mit der E M K zusammenfällt,

$$J_N = \frac{100}{23,5} = 4,3 \text{ A}.$$

Der Gesamtstrom J wäre somit:

$$J = \sqrt{3,5^2 + 4,3^2} = 5,5 \text{ A}.$$

Platzt nun der Kohlenfaden, so fliesst der Gesamtstrom von 5,5 A ausschliesslich durch die Windungen der Drosselspule und erzeugt eine magnetomotorische Kraft von

$$M = \frac{4\pi}{10} \cdot 5,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 588 = 5750$$

einen Kraftlinienstrom Φ

$$\Phi = \frac{M}{\mathfrak{w}} = \frac{5750}{0,2} = 27750$$

und eine E M K

$$E = 4 \times 50 \times 588 \times 27750 \times 10^{-8} = 32,6 \text{ V}.$$

Anstatt 23,5 V verbraucht somit nunmehr die Drosselspule 32,6 V, und dieser Mehrverbrauch wird, wenn viele Lampen hinter einander geschaltet sind, nur wenig merkbar sein.

---

[1]) Dieses Beispiel entnehmen wir Feldmann, Transformatoren, S. 502. Man vergl. auch Kap. II, Abschn. 11., S. 47.

Die Drosselspule konsumiert, solange sie einen Nebenschluss zur Lampe bildet, eine fast verschwindende Energiemenge und verhindert, wenn die Lampe erlischt, eine Stromunterbrechung.

15. Sicherheitsmassregeln beim Gebrauche von Transformatoren.

Da die primären und sekundären Wickelungen eines Transformators durch isolierende Zwischenschichten getrennte Leiter sind, die erhebliche Spannungsunterschiede besitzen, werden zwischen denselben elektrostatische Ladungserscheinungen auftreten, wie bei einer Leydener Flasche.

Es erscheint nicht ausgeschlossen, dass unter ungünstigen Umständen die Isolation zwischen der primären und sekundären Wickelung durchbrochen wird, und dann Ströme von lebensgefährlichen hohen Spannungen in die zugänglichen Gebrauchsleitungen eintreten. Man hat daher verschiedene Einrichtungen ausgedacht, durch welche diese Gefahr vermindert oder ausgeschlossen wird.

Man ordnet z. B. zwischen den beiden Wickelungen ein von denselben isoliertes Kupferblech an und verbindet dieses mit der Erde; oder man legt nach einem Vorschlage von Kapp die Mitte der sekundären Spule an Erde. Tritt durch eine Verletzung der Isolation der hochgespannte Strom aus, so wird er im ersten Falle durch die leitende Zwischenschicht, im zweiten Falle unmittelbar zur Erde abgeleitet, und damit die Gefahr beseitigt.

Ferranti verbindet die Lampenleitungen durch die hinter einandergeschaltete Primärwickelung zweier kleiner Transformatoren, deren Sekundärwickelungen parallel geschaltet und durch einen Abschmelzdraht verbunden sind. Der Abschmelzdraht hält einen federnden Ausschalter zurück.

So lange die Isolation überall tadellos ist, fliesst durch beide primären Spulen der Hilfstransformatoren derselbe Strom; die in den Sekundärwickelungen induzierten E M Kräfte halten sich das Gleichgewicht und es fliesst durch den Abschmelzdraht kein Strom.

Die Verbindung der beiden Primärspulen ist an Erde gelegt, daher wird dieses Gleichgewicht sofort gestört, sowie ein Isolationsfehler entsteht. Der Sicherheitsdraht schmilzt, der Ausschalter fällt zu, schliesst die Lampenleitung kurz und legt sie an Erde.

Dadurch ist jede Gefahr beseitigt. Gleichzeitig schmelzen wegen der plötzlichen Zunahme des Sekundär- und Primärstromes im Haupttransformator die Bleisicherungen zwischen der Hochspannungsleitung und der primären Wickelung und schalten damit den beschädigten Transformator selbstthätig aus.

Die Hauptgefahr für eine Verletzung der Isolation infolge Durchschlagens liegt vor, wenn ein neuer Transformator an die Hauptleitung angeschlossen wird. Um die Isolation besonders gut zu machen, wärmt man daher den Transformator erst ungefähr 24 Stunden lang sorgfältig an, ehe man ihn mit voller Spannung beansprucht.

Es geschieht dies am besten dadurch, dass man, nachdem der Transformator angeschlossen worden ist, längere Zeit die Strom erzeugenden Maschinen mit halber Geschwindigkeit laufen lässt, oder, wenn dies nicht angängig ist, dass man die primäre Wickelung des neu einzuschaltenden Transformators zunächst hinter die primäre Wickelung eines anderen Transformators schaltet. (Vergl. Fig. 162.)

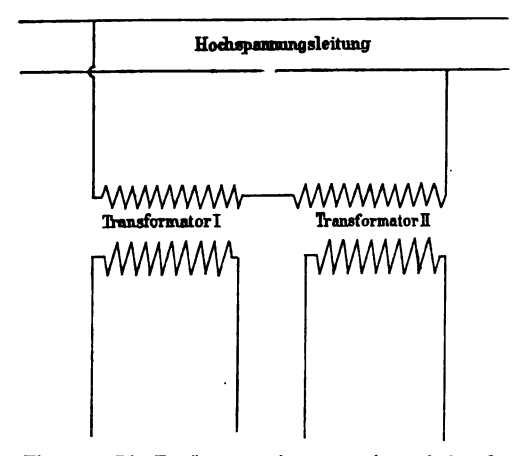


Fig. 162. Die Erwärmung eines neu einzuschaltenden Transformators.

Wenn irgend möglich, soll späterhin der Transformator gar nicht wieder vom Hochspannungsnetz losgelöst werden, damit er, auch wenn er nicht belastet ist, infolge der Magnetisierungsarbeit immer eine höhere Temperatur beibehält, und keine Feuchtigkeit in die Wickelungen eindringen kann.

8. Kapitel.

Wechselstrommotoren und Zweiphasenmotoren.

1. Synchrone Wechselstrommotoren.

Auch mit Wechselstrom lassen sich Elektromotoren betreiben. Für Energieübertragungen auf weite Entfernungen, bei denen man nur mässige Kosten für die Leitungen aufwenden will, ist man genötigt, Wechselstrom zu verwenden, da man dann mit hohen Spannungen arbeiten muss, und sich Gleichstrommaschinen für höhere Spannungen, als etwa 1000 Volt, nur schwierig herstellen lassen.

Die Aufgabe Wechselstrommotoren zu konstruieren, die den Anforderungen der Praxis genügen, hat in dem letzten Jahrzehnt daher die Elektrotechniker lebhaft beschäftigt. Man wünschte an Beleuchtungscentralen, die mit Wechselstrom betrieben werden, Elektromotoren anschliessen zu können, und sah sich genötigt, für Energieübertragungen nach sehr weit entfernt gelegenen Orten, aus den soeben angegebenen Gründen, Wechselstrom in Aussicht zu nehmen, wenn Gründe vorlagen, auf den Gebrauch von Drehstrom zu verzichten.

Jede Gleichstrommaschine für Reihenschaltung (Hauptstrommaschine), sowie jede Nebenschlussmaschine kann mit Wechselstrom in Gang gesetzt und betrieben werden, wenn nur ihre Feldmagnete zur Verhütung von Wirbelströmen aus einzelnen von einander isolierten Eisenblättern hergestellt werden. Da sowohl die Stromrichtung im Anker, als die Polarität der Feldmagneten sich gleichzeitig bei jedem Richtungswechsel des Stromes umkehren, behält die Drehrichtung des Ankers ihren Sinn bei. Solche Motoren gehen auch von selbst an.

Wegen der bedeutenden Hysteresisverluste in den Eisenteilen der Maschine und wegen der grossen Selbstinduktion ist aber der Wirkungsgrad von Wechselstrommotoren, die nach Art der Gleichstrommaschinen gebaut sind, gering, so dass höchstens für ganz kleine Leistungen an ihre praktische Verwendung gedacht werden kann.

Es kann ferner auch jede Wechselstrommaschine als Motor laufen und dabei mit gutem Wirkungsgrade arbeiten; der Nachteil dabei ist jedoch der, dass diese Maschinen nicht von selbst angehen, wenn nicht besondere Anlasseinrichtungen vorgesehen sind. Solche Maschinen müssen erst in Gang gesetzt werden, und ihre Feldmagneten müssen durch eine besondere Stromquelle oder durch gleichgerichteten Wechselstrom erregt werden. Sowie allerdings ein solcher Motor nahezu die Geschwindigkeit erreicht hat, bei der er Wechselströme von gleicher Periode liefern würde, dann bewirkt der zugeführte Strom rasch einen völligen Ausgleich etwa noch vorhandener Unterschiede, und Generator und Motor laufen von da an in völlig gleichem Takte. Man nennt solche in gleichem Takte laufende Maschinen synchrone. Eine als Motor laufende gewöhnliche Wechselstrommaschine ist daher ein Synchronmotor.

Ein besonderer Übelstand ist der, dass für die Erregung des Magnetfeldes des Synchronmotors Gleichstrom erforderlich ist. Man muss also entweder eine Akkumulatorenbatterie zur Verfügung haben, oder es muss mit dem Motor eine Gleichstrommaschine verbunden werden, die den erforderlichen Strom liefert. Bei den selbsterregenden Wechselstrommaschinen von Zipernowski, die wir auf S. 136 abgebildet haben, wird dieser Gleichstrom durch einen Stromwender geliefert, der im Nebenschluss zum Hauptstrome liegt und einen Teil des zugeführten Wechselstromes gleich richtet.

Gewöhnlich verfährt man so, dass man auf der Welle der als Motor laufenden Wechselstrommaschine den Anker einer kleinen Gleichstrommaschine anbringt und den Strom dieser Hilfsmaschine sowohl zum Erregen der Feldmagneten, als auch zum Laden einer Akkumulatorenbatterie verwendet. Beim Ingangsetzen des Wechselstrommotors liefert dann die Akkumulatorenbatterie den erforderlichen Strom, und die Gleichstrommaschine kann von der Batterie aus für kürzere Zeit als Gleichstrommotor in Thätigkeit gesetzt werden, um den beweglichen Teil der selbstverständlich unbelasteten Wechselstrommaschine auf die zur Herstellung des Synchronismus erforderliche Umlaufszahl zu bringen.

Sowie der Synchronismus erreicht ist, kann die Belastung aufgelegt werden.

Man erkennt aus all diesen Betrachtungen, dass synchrone Wechselstrommotoren mit Belastung nicht angehen und nur mit einer gewissen Umlaufszahl laufen können, eben der, die dem Synchronismus entspricht.

Übersteigt die Belastung einen gewissen Höchstwert, so erniedrigt sich die Umlaufszahl des Synchronmotors; derselbe kommt dadurch aus dem Synchronismus und bleibt stehen.

Um synchrone Wechselstrommotoren herzustellen, die von selbst angehen, sind verschiedene Kunstgriffe vorgeschlagen und in Anwendung gebracht worden.

Man kann z. B. Anker- und Feldwickelung hinter einander schalten und den Motor als Serien- oder Hauptstrommaschine anlaufen lassen.

Am zweckmässigsten scheint man es jedoch gefunden zu haben, die Maschinen als Zweiphasenmotoren anlaufen zu lassen und dann, nachdem der Synchronismus erreicht ist, die zweite Phase, die sogenannte Hilfsphase, oder Kunstphase, in Wegfall zu bringen. Um einen Motor, der durch zwei Drähte mit einphasigem Wechselstrom gespeist wird, mit zwei in der Phase gegen einander verschobenen Wechselströmen angehen zu lassen, können verschiedene Hilfsmittel zur Anwendung gebracht werden. Man versieht den Motor mit einer zweiten Wickelung, die von einem abgezweigten Teile des Hauptstromes durchflossen wird; diese Hilfswickelung kann, weil sie nur kurze Zeit in Thätigkeit bleibt, aus Draht von geringerem Querschnitte hergestellt werden. Dadurch, dass man z. B. dem diese Wickelung durchfliessenden Strome eine von der Hauptwickelung verschiedene Selbstinduktion giebt und sie der ersten parallel schaltet, entsteht infolge der Phasenverschiebung ein magnetisches Drehfeld, durch das der Motor zum Angehen gebracht wird. Ist der Synchronismus erreicht, so unterbricht man die Hilfswickelung und der Motor läuft nun synchron weiter.

Die Phasenverschiebung in dieser zweiten Wickelung kann auf verschiedene Weise herbeigeführt werden. Man kann die Hauptwickelung z. B. als Trommelwickelung, die Hilfswickelung ähnlich ausführen, wie die Wickelung eines Grammeringes, dann besitzt letztere im allgemeinen eine wesentlich grössere Selbstinduktion als die erstere.

Man kann ferner in den Nebenschluss, der durch die Hilfswickelung gebildet wird, die Windungen eines Elektromagneten, eine Drosselspule, einschalten und dadurch eine grosse Selbstinduktion einführen, oder man kann die eine Wickelung von einem Transformator aus speisen, dessen primäre Wickelung von einem Teile des Hauptstromes durchlaufen wird.

Endlich kann man eine Phasenverschiebung in entgegengesetztem Sinne dadurch bewerkstelligen, dass man parallel einer Wickelung eine Kapazität schaltet. (Vergl. die in Fig. 163 abgebildete Anordnung, die von Brown und der Maschinenfabrik Oerlikon benutzt wird.) Für letzteren Zweck eignet sich besonders eine Zersetzungszelle mit grosser Oberfläche, die man dadurch erhält, dass man über einander eine grosse Zahl konischer Eisenbleche anordnet, die man durch

isolierende Zwischenstücke von einander getrennt erhält, und deren Zwischenraum mit einer Lösung von Soda in Wasser gefüllt wird (vergl. Fig. 163). Auch in diesem Falle wird die Zersetzungszelle ausgeschaltet, sobald durch die Wirkung der beiden in der Phase verschobenen Wechselströme der Motor zum Anlaufen und zum Synchronismus mit dem Stromerzeuger gebracht worden ist.

2. Asynchrone einphasige Wechselstrommotoren.

Diese Motoren beruhen auf einer eigentümlichen Beobachtung, die Elihu Thomson gelegentlich seiner Untersuchungen über anziehende und abstossende Wirkungen von Wechselströmen in den Jahren 1886 und 1887 gemacht hat.

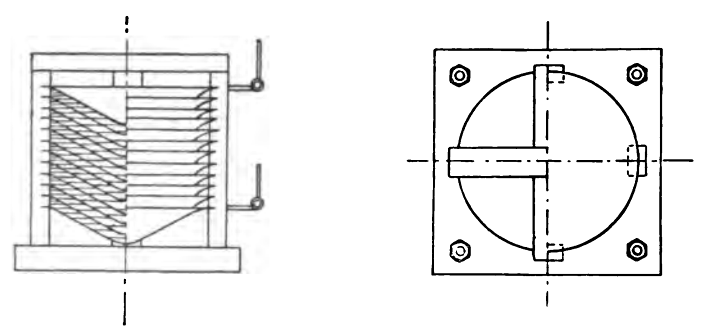


Fig. 163. Elektrolytische Zelle zur Einführung einer Kapazität in einen Wechselstromkreis.

Bringt man vor einen Wechselstromelektromagnet, also in ein sich periodisch umkehrendes Magnetfeld, einen Kupferring, so sucht sich dieser Ring aus dem Magnetfeld heraus zu bewegen, oder er dreht sich derart, dass seine Ebene der Richtung der Kraftlinien parallel wird.

Nimmt man statt des Kupferringes eine in sich geschlossene, drehbare Spule, die eine merkliche Selbstinduktion hat, so tritt zwischen dem Phasenzustand des Feldes und der in den Windungen dieser Spule induzierten EMK eine Phasenverschiebung ein, die um so mehr von der normalen von 90^0 abweicht, je grösser diese Selbstinduktion ist. Alsdann entwickelt sich, wenn die Spule im Magnetfelde einmal in Umlauf versetzt ist, ein Drehungsmoment an dieser Spule, das die Spule in Umdrehungen zu erhalten strebt. Dieses Drehungsmoment ist am kräftigsten, wenn $\omega \cdot L = w$ ist, wobei $\omega = 2 \pi \sim$, L der Selbstinduktionskoeffizient, w der Widerstand der Spule und $\sim$ die Anzahl der Perioden des Wechselstromes in einer Sekunde ist.

Elihu Thomson hat, auf diese Beobachtung gestützt, selbst einen Wechselstrommotor konstruiert. Derselbe ähnelte äusserlich sehr einer Gleichstrommaschine mit unterteiltem Eisenkerne der Feldmagneten. Die Bürsten des gewöhnlichen Gleichstromankers wurden unter einem Winkel von 45° gegen die Richtung der Kraftlinien verstellt und durch einen Kurzschlussdraht mit einander verbunden (vergl. Fig. 164). Sendete man nun durch die Windungen der Feldmagneten einen gewöhnlichen Wechselstrom, so lief der Motor mit beträchtlichem Drehungsmoment von selbst an. War der Anker einmal in rasche Umdrehungen gelangt, so konnte man die Bürsten ganz abheben, oder durch einen über dem Kollektor geschobenen Ring alle Windungen gleichzeitig kurz schliessen, der Anker drehte sich fort und war imstande, ein erhebliches Drehungsmoment auszuüben, also Arbeit zu leisten.

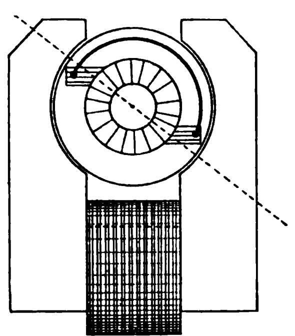


Fig. 164.
Asynchroner Wechselstrommotor von Elihu Thomson.

Die Richtung der Drehung hängt davon ab, nach welcher Seite hin der Anker einen Anstoss erhält. Von einem wirklichen Synchronismus kann im vorliegenden Falle naturgemäss nicht die Rede sein. Die Geschwindigkeit des Ankers ist am grössten beim Leerlauf und nimmt mit zunehmender Belastung ab.[1])

In wesentlich vollkommenerer Weise haben späterhin Brown, von Dobrowolski und die Maschinenfabrik Oerlikon dieses Prinzip angewendet und erhebliche Vorteile besonders dadurch erreicht, dass sie die Windungen, sowohl des rotierenden, als des ruhenden Teiles in Löcher einbetteten, die möglichst dicht unter der Oberfläche durch das Eisen gebohrt waren. Dadurch konnte der Luftzwischenraum zwischen Ankereisen und Eisen der Feldmagnete auf ein Minimum herabgedrückt und die magnetische Streuung wesentlich vermindert werden. Ausserdem aber können auch für Wechselströme ungeteilte Leiter von erheblichen Querschnitten verwendet werden, wenn dieselben sich ganz im Innern des Eisens befinden, während sonst stärkere Leitungen aus mehreren von einander isolierten Drähten hergestellt werden müssen. In starken Kupferdrähten, die sich in von Wechselströmen erzeugten, periodisch sich ändernden Kraftlinienfeldern bewegen, entstehen sonst Wirbelströme, die nicht nur Energieverluste ver-

[1]) Eine Theorie der asynchronen Einphasenmotoren hat Sahulka gegeben. ETZ 1893, S. 391.

anlassen, sondern auch beträchtliche, schädlich wirkende Wärmemengen erzeugen. Fig. 165 erläutert die Einrichtung eines solchen asynchronen Wechselstrommotors.

Der der Induktionswirkung unterworfene rotierende Teil W ist entweder eine Trommel oder ein Grammering, die mit einer geschlossenen Wickelung versehen sind. Der die Induktionswirkung veranlassende ruhende Teil des Apparates (J) besteht aus einem Hohlcylinder, der aus von einander isolierten Eisenblechen zusammengesetzt ist. Ganz nahe dem inneren Umfange sind diese Bleche gelocht und tragen eine Wickelung, die entweder als Ring-, Trommel- oder Wellenwickelung ausgeführt werden kann. Die Schaltung ist derart gewählt, dass eine Anzahl Polpaare entsteht; in Fig. 165 giebt es nur ein Paar.

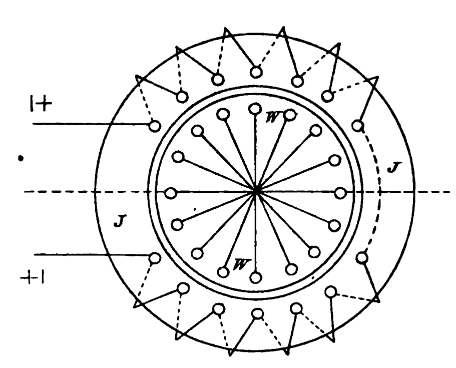


Fig. 165. Schematische Darstellung der Einrichtung eines asynchronen Wechselstrommotors mit Kurzschlussanker.

Die Kurzschlusswickelung auf dem rotierenden Anker kann auf verschiedene Weise hergestellt werden. Zumeist besteht dieselbe bei diesen und ähnlichen Apparaten aus Kupferstäben, die vom Eisenkörper isoliert sind, nahe dem äusseren Umfange, parallel der Drehachse, durch den Eisenkörper gehen und rechts und links durch Kupferringe mit einander verbunden sind. Die Kupferstäbe zwischen diesen beiden Kupferringen bilden dann einen ähnlichen Körper, wie die Laufrollen, die sich an den Käfigen mancher Eichhörnchen befinden; diese Art von Kurzschlussanker führt daher vielfach den Spitznamen »Eichhornkäfig«.

Neuerdings hat von Dobrowolski darauf hingewiesen, dass auf die Isolation der Stäbe von dem Eisen ohne Nachteil verzichtet werden kann.

Fig. 166 zeigt beispielsweise einen solchen Kurzschlussanker, wie ihn Brown, Boveri & Cie. anwenden.

Neuerdings wird die Wickelung des induzierenden Teiles J′ in ganz ähnlicher Weise durchgeführt, wie dies bei gewöhnlichen Wechselstromerzeugern der Fall ist. (Vergl. Fig. 121 S. 156.)

Fig. 167 stellt einen solchen asynchronen Einphasenmotor von Brown, Boveri & Cie. dar. Der Deckel mit dem einen Lager

ist abgenommen, so dass man die Feldwickelung und den Kurzschlussanker sehen kann.[1])

[1]) Der in Fig. 167 abgebildete vierpolige Motor ist für eine Leistung von

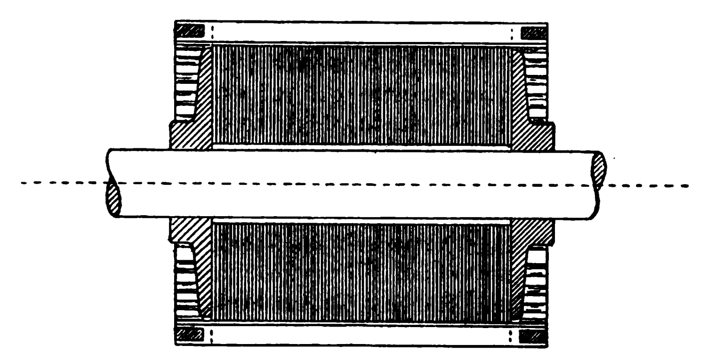


Fig. 166. Kurzschlussanker für Asynchronmotoren, sogenannter Eichhornkäfig.

6 Pferdestärken und 1200 Umläufen in 1 Minute bestimmt. Der zum Betriebe erforderliche Wechselstrom hat eine Spannung von 100 Volt und eine Stärke von 70 Ampère. Das feststehende Feld ist mit 132 Drähten von 25 *qmm* bewickelt. Der Querschnitt des Feldeisens beträgt 220 *qcm*. Der umlaufende

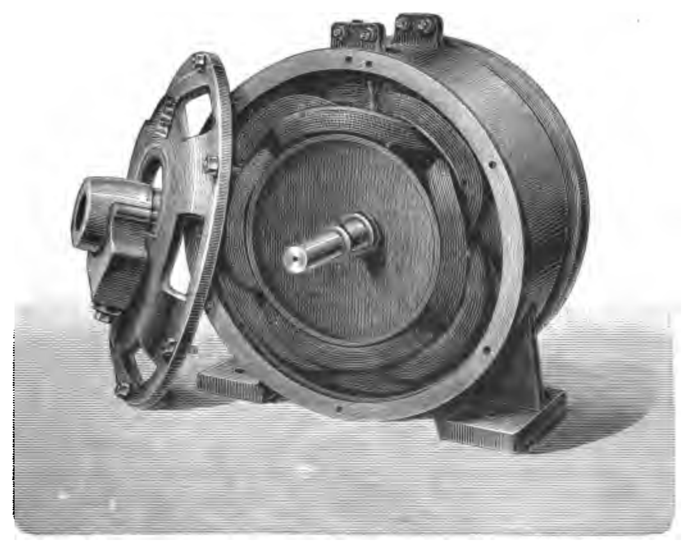


Fig. 167. Asynchronmotor mit Kurzschlussanker von Brown, Boveri & Cie.

Anker hat einen Eisenquerschnitt von 200 *qcm* und trägt 36 Stäbe von je 80 *qmm* Querschnitt.

Bei einem ebenfalls vierpoligen Asynchronmotor für $3^1/_2$ Pferdestärken und 1200 Umläufe, der von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut ist, be-

Bei Maschinen für grössere Leistungen wird der Anker mit einer regelmässigen Wickelung versehen (Brown'scher Phasenanker) und um das Angehen zu erleichtern, wird in diese Ankerwickelung noch ein Widerstand eingeschaltet, der durch Schleifringe und Bürsten mit dieser Wickelung verbunden ist. Wenn der Motor die normale Geschwindigkeit erreicht hat, werden die Bürsten kurz geschlossen. Um die Motoren anzulassen, wird oft auf eine der vorher angegebenen Weisen eine Kunstphase hinzugefügt, so dass der Motor als Zweiphasenmotor anläuft. So wie die volle Umlaufszahl erreicht ist, wird diese zweite Phase durch Verschieben eines Umschalters ausser Thätigkeit gesetzt.

Die Fig. 168 stellt schematisch die Schaltung eines solchen Einphasenmotors mit der einen Flüssigkeitskondensator enthaltenden Anlassvorrichtung dar. Soll die Drehrichtung des Motors geändert werden, so werden die beiden Zuleitungsdrähte in den bei E befindlichen Klemmen vertauscht.

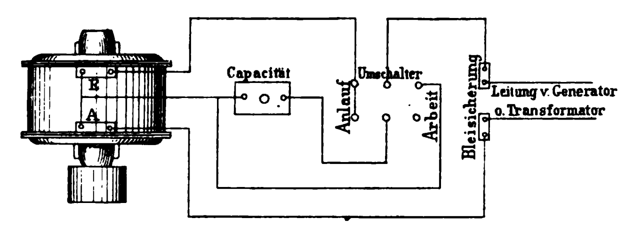


Fig. 168. Verbindung der Schaltvorrichtung eines asynchronen Wechselstrommotors mit der Leitung und dem Motor.

Man lässt mit Hilfe der Anlassvorrichtung den Motor unbelastet anlaufen, stellt dann den Umschalter auf »Arbeit« um und legt nunmehr, etwa durch eine Reibungskuppelung, oder indem man den Riemen von der Leerscheibe auf die mit der Motorachse verbundene Riemenscheibe hinüberschiebt, die Belastung auf. Beim Anhalten nimmt man zunächst die Belastung weg und unterbricht dann den Strom. Während der Arbeit bedürfen diese Motoren, da sie mit

trägt der äussere Durchmesser der Eisenbleche des das Feld bildenden Ringes 350 *mm*, der innere Durchmesser oder die Bohrung ist 220 *mm*, die Länge 180 *mm*. Es sind 60 Nuten vorhanden und in diesen liegen 360 Drähte von 4 *mm* Dicke (5 *mm* besp.). Die Tiefe der Nuten beträgt 19 *mm*, die Zahnbreite 8,5 *mm*. Der Kurzschlussanker hat einen äusseren Durchmesser von 218 *mm*, einen inneren Durchmesser von 118 *mm*. Derselbe hat nahe der Oberfläche 50 Löcher von 8 *mm* lichte Weite. In jedem dieser Löcher befindet sich, gut isoliert, ein Kupferstab von 5,8 *mm* Dicke und 190 *mm* Länge. Zur Verbindung dieser Stäbe dienen Kupferringe von 216 und 200 *mm* Durchmesser und 13 *mm* Dicke. Der zum Betriebe erforderliche Wechselstrom hat bei 40 Perioden eine Spannung von 110 Volt und eine Stärke von 28 Ampère.

selbstthätiger Ringschmierung versehen sind, durchaus keiner Bedienung.

Die Fig. 169 zeigt in Längsschnitt und Seitenansicht einen asynchronen Wechselstrommotor der Maschinenfabrik Oerlikon für Betrieb durch einphasigen Wechselstrom, der seit Anfang des Jahres 1893 in Chur in Thätigkeit ist.

Die Anordnung entspricht im allgemeinen völlig der des vorher beschriebenen Brown'schen Asynchronmotors. Die induzierende Wickelung befindet sich auf einem Hohlcylinder, in dessen Innerem der Kurzschlussanker (Eichhornkäfig) umläuft.

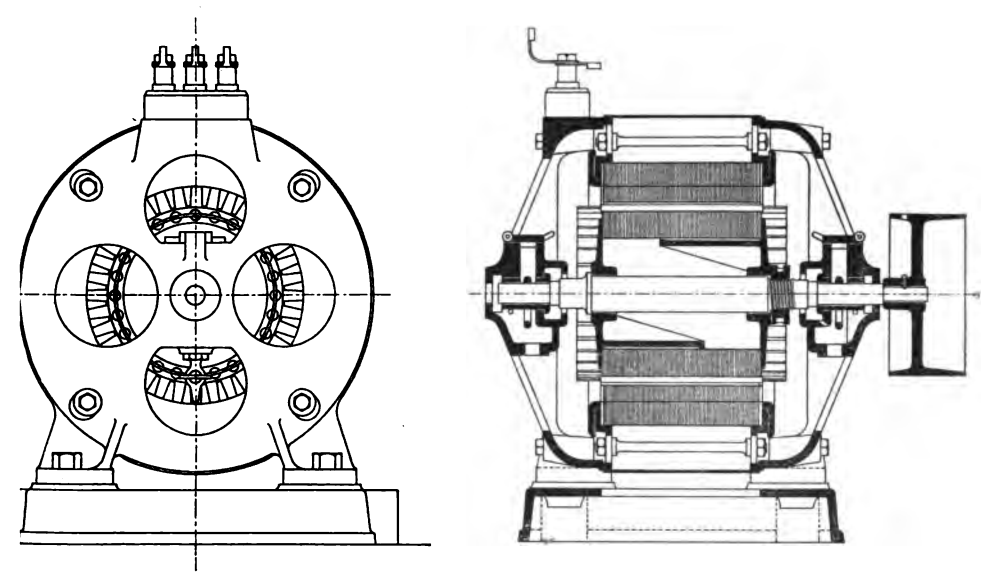


Fig. 169. Asynchronmotor mit Ringwickelung der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Drähte der induzierenden Wickelung liegen auf der Innenseite des Hohlcylinders in Nuten.

Jeder Motor hat drei Klemmen; zwischen den Klemmen 1 und 2 liegt die Hauptphase, zwischen 2 und 3 die Hilfsphase. Bei Inbetriebsetzung des Motors werden die zu beiden Phasen gehörigen Wickelungen parallel und, nachdem der Motor eine genügende Umlaufszahl erreicht hat, hinter einander geschaltet und die zur Erzeugung der Kunstphase dienende Vorrichtung ausgeschaltet. Hierzu dient ein einziger sehr zweckmässig konstruierter Umschalter. Die Motoren können mit geringer Belastung anlaufen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Anlassvorrichtung (Fig. 170), sowie die Verbindungen der Schaltvorrichtung mit dem Leitungsnetze und mit dem Motor (Fig. 171).

Bei dem Ingangsetzen eines asynchronen Wechselstrommotors mittels der in Fig. 171 dargestellten Vorrichtung verfährt man in folgender Weise: Bei Stillstand, also vor dem Beginn des Anlaufes, befindet sich der Hebel H in einer mittleren Stellung, so dass er weder die Kontakte K noch L berührt. Bringt man nun den Hebel in die Lage L, so ist die Hilfsphase eingeschaltet, und der Motor beginnt zu laufen. Hat er nach kaum einer Minute die gewünschte Umlaufszahl erreicht, was man daran erkennt, dass der schwache singende Ton, den der Anker hervorbringt, nicht mehr steigt, so legt man rasch den Hebel in die Stellung K um. In dieser Stellung bleibt der Hebel so lange, als der Motor Arbeit geben soll. — Soll angehalten werden, so dreht man den Hebel in die mittlere Lage, in der seine Kontaktschneiden weder bei K noch bei L berühren.

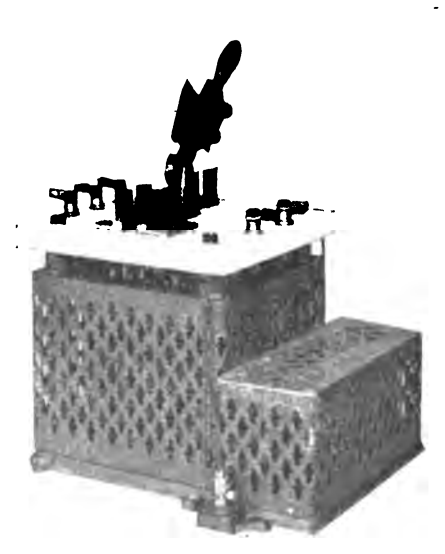


Fig. 170. Anlassvorrichtung der Maschinenfabrik Oerlikon für Wechselstrommotoren.

In der Abbildung Fig. 172 ist ein grösserer derartiger für eine Leistung von 45 Pferdestärken bestimmter, achtpoliger Asynchronmotor der Maschinenfabrik Oerlikon mit Voll- und Leerscheibe und Ausrückvorrichtung für den Riemen dargestellt.

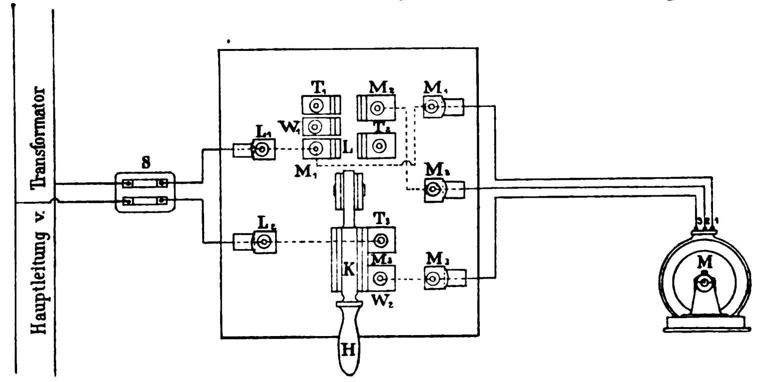


Fig. 171. Schaltvorrichtung der Maschinenfabrik Oerlikon für asynchrone Wechselstrommotoren.

Der Motor ist für Wechselstrom von 250 Volt und 50 Perioden in der Sekunde bestimmt; unter diesen Verhältnissen macht er vollbelastet 730 Umläufe in einer Minute.

Das ruhende Feld besteht aus 144 Stäben. (5,5 × 12,5 *mm*),

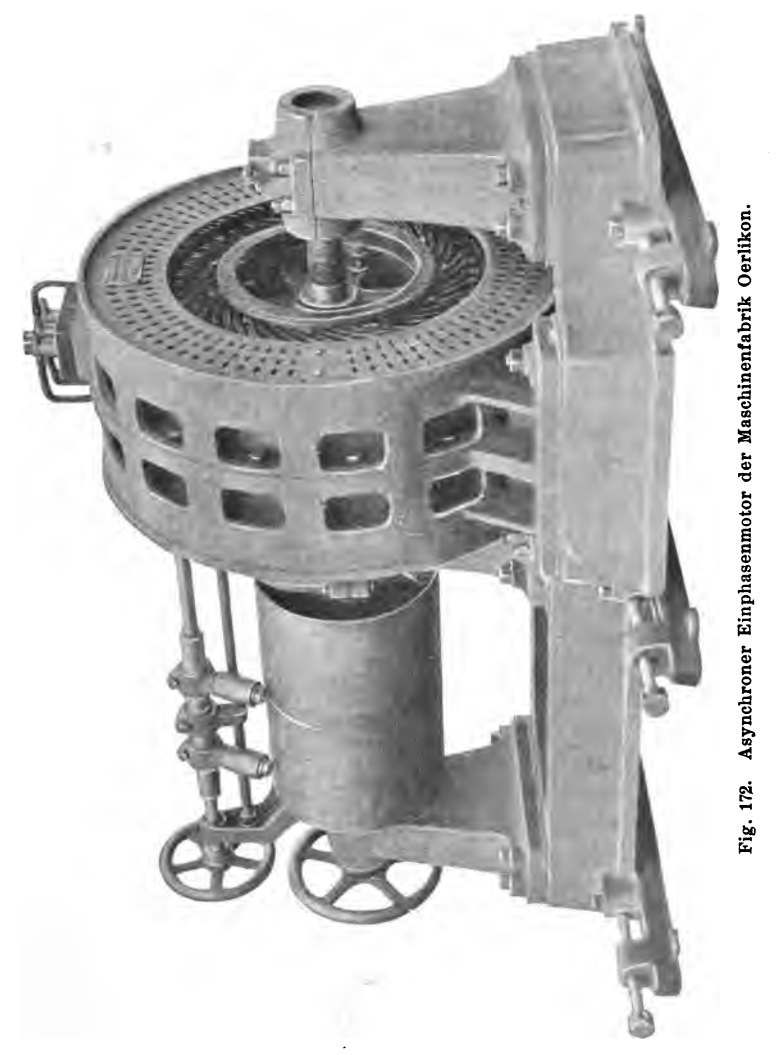


Fig. 172. Asynchroner Einphasenmotor der Maschinenfabrik Oerlikon.

Bohrung im Felde: 600. Zwei Drittel der Leiter im Felde bilden die Hauptphase; in ihnen fliesst der einphasige Wechselstrom, der durch die Leitungen zugeführt wird. Ein Drittel der Leiter wird nur beim Anlauf von dem Strom der Hilfsphase durchflossen.

Der Anker besteht aus 168 Stäben (6 *mm*) und besitzt einen Durchmesser von 598 *mm*.

Der grosse Vorteil aller Motoren dieser Art ist der, dass sie mit zwei Leitungsdrähten an gewöhnliche Wechselstromcentralen angeschlossen werden können und nahezu dieselben Vorzüge besitzen, die wir späterhin bei den Drehstrommotoren noch hervorheben werden. Der Nachteil dieser Apparate liegt darin, dass ihre Leerlaufstromstärke ziemlich gross ist, dass man beim Anlaufen hohe Stromstärken braucht und die Zuführungsleitungen und Transformatoren darnach dimensionieren muss. Umlaufszahl und Belastung sind an gewisse Grenzen gebunden. Bei Überlastung bleibt der Motor stehen. Die Vorteile sind aber doch so überwiegend, dass

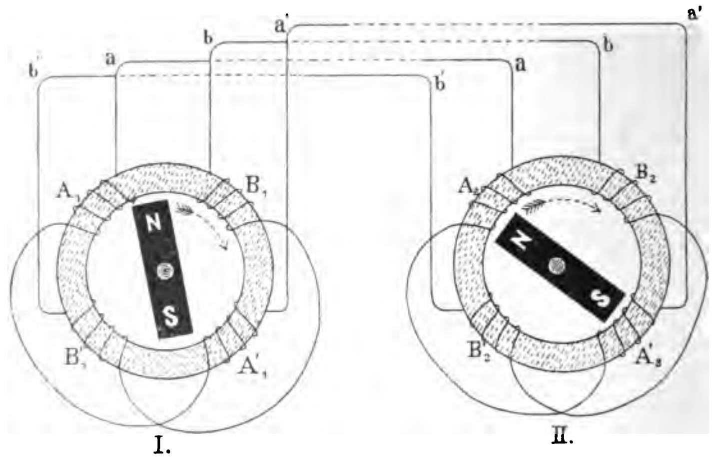


Fig. 173. Verbindung einer idealen Zweiphasenmaschine mit einem Zweiphasenmotor.

alle grösseren Firmen, die sich mit Wechselstromanlagen beschäftigen, ähnlich eingerichtete asynchrone Wechselstrommotoren bauen.

Wir wollen hier noch ergänzend hinzufügen, dass die meisten asynchronen Wechselstrommotoren mit geringfügiger Änderung der Schaltung auch als Zweiphasen- und Dreiphasenmotoren laufen können und mit diesen den grossen Vorteil gemein haben, dass der Arbeitsstrom nur die feststehenden Wickelungen des ruhenden Feldmagneten durchfliesst.

Da übrigens die Bezeichnungen Feldmagnet und Anker bei solchen Apparaten nicht mehr ganz passend erscheinen, gebrauchen die Engländer und Amerikaner für den ruhenden Feldmagnet der Wechselstrommotoren auch die Bezeichnung Stator und für den umlaufenden Anker den Namen Rotor. Gegen die unveränderte

Übernahme dieser Worte in den deutschen Sprachgebrauch hat man mit Recht Einwendungen erhoben und dafür die Ausdrücke Ständer und Läufer in Vorschlag gebracht.

In welcher Weise durch zwei in der Phase verschobene Wechselspannungen die in zwei gegen einander versetzten Wickelungen wirken, der Anker eines Elektromotors in Umlauf gebracht werden kann, wird in dem nächsten Abschnitte näher auseinandergesetzt.

3. Entstehung eines magnetischen Drehfeldes durch zwei in der Phase verschiedene Wechselströme.

Zur Erläuterung der Entstehung eines rotierenden Magnetfeldes durch zwei in der Phase um 90° verschobene Wechselströme bedienen wir uns einer einfachen Vorrichtung, die in Fig. 173 dargestellt wird.

Als Stromerzeuger dient eine Wechselstrommaschine I, die aus einem Grammeringe besteht, der mit vier, einen Winkel von je 90°

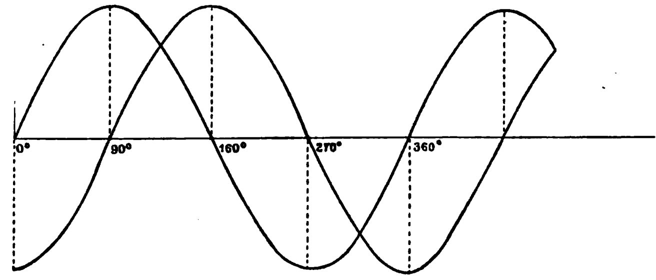


Fig. 174. Zwei um 90° in der Phase gegen einander verschobene Ströme.

mit einander bildenden Wickelungen versehen ist, in deren Innerem ein Magnet oder Elektromagnet NS auf geeignete Weise in der Richtung des Pfeiles in Umdrehung versetzt wird. Die um 180° von einander abstehenden Wickelungen $A_1 A'_1$ und ebenso $B_1 B'_1$ sind hinter einander geschaltet; von jedem solchen Paare führen dann je zwei Leitungen aa′ und bb′ zu dem ganz gleich eingerichteten Motor II.

In den Wickelungen $A_1 A'_1$ und $B_1 B'_1$ werden zwei Wechselspannungen erzeugt, die in der Phase genau um 90° oder eine Viertelperiode von einander verschieden sind. (Vergl. Fig. 174.) Die Maxima der induzierten EMK in den Windungen $A_1 A'_1$ treten ein, wenn in $B_1 B'_1$ keine EMK vorhanden ist; in $B_1 B'_1$ erreicht eine Viertelperiode später die EMK ihren positiven Höchstwert, wenn die EMK in AA′ gerade durch Null hindurchgeht. In dem als Motor dienenden Apparat II wird durch die entstehenden Ströme ein umlaufendes Magnetfeld erzeugt. Wenn die Stromstärke in den Spulen AA′ ein Maximum erreicht, ist sie in den Spulen BB′ gleich Null; die

magnetisierende Wirkung dieses Stromes ruft im Grammeringe des Apparates II zwei Doppelpole hervor, die genau unter den Mitten der Wickelung BB′, in der Richtung des grossen Pfeiles in Fig. 175 I liegen. Diese Doppelpole üben auf den drehbaren Magnet der Vorrichtung II ein Drehungsmoment aus.

Wenn die Stromstärke in $A_2 A'_2$ fällt, beginnt sie in $B_2 B'_2$ zu steigen; beide Windungen erzeugen Kraftlinienfelder, die sich zu einem schräg stehenden Felde zusammensetzen, wie dies z. B. Fig. 175 II zeigt.

In der Zeichnung ist die Stärke der Ströme durch die Dicke der Striche angedeutet.

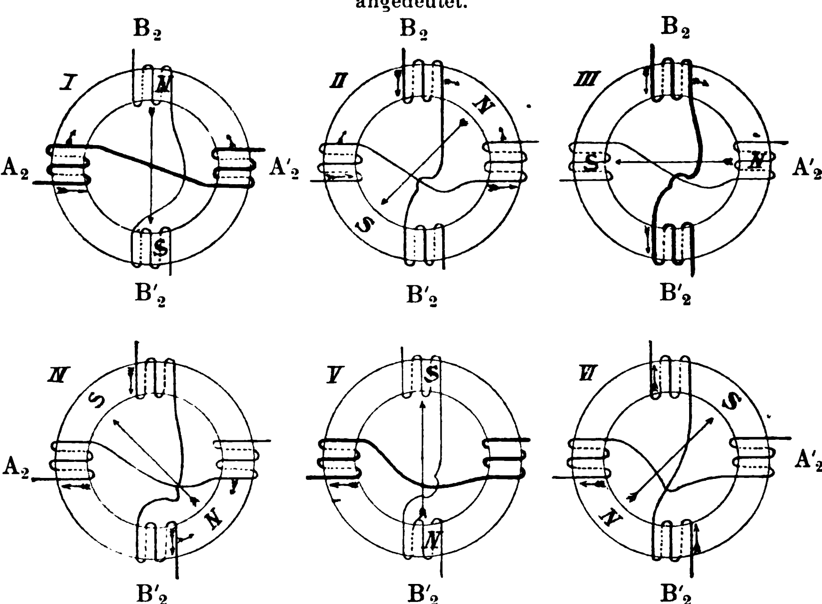


Fig. 175. Die aufeinander folgenden Lagen des Magnetfeldes beim idealen Zweiphasenmotor in den ersten sechs Achteln einer Wechselstromperiode.

In Fig. 175 III, IV, V, VI ist die Lage der resultierenden Pole noch um vier Achtel einer vollen Wechselstromperiode weiter verfolgt, und man sieht, dass die Pole in der Zeit einmal um die Peripherie des Ringes umlaufen, in der eine volle Periode der Wechselströme abläuft. Die Pole drehen sich also in einem solchen Ringe, und ein innerhalb des Ringes befindlicher beweglicher Magnet NS wird der Drehung dieses magnetischen Drehfeldes folgen.

Aber auch ein Kupfercylinder wird infolge der in ihm erzeugten Wirbelströme dem Felde folgen, wie bei dem bekannten Arago'schen

Versuche die bewegliche Kupferscheibe dem unter ihr rotierenden Magnete folgt. Damit jedoch diese induzierten Ströme nicht regellos fliessen, sondern so, wie sie es müssen, um das höchste Drehungsmoment zu erzeugen, nämlich rechtwinklig sowohl zu den magnetischen Kraftlinien als auch zur Bewegungsrichtung, empfiehlt es sich, einen Eisenkern mit einer in sich geschlossenen Wickelung, einer Kurzschlusswickelung, zu versehen, deren Drähte die gewünschte Lage haben.

Nach diesem Prinzipe, das von Ferraris und Tesla entdeckt worden ist, sind schon im Jahre 1889 Elektromotoren von ziemlich hohem Wirkungsgrade (85 % bei einer 7 HP Maschine) hergestellt worden. Dieselben zeigten besonders die schätzenswerte Eigenschaft, mit Belastung anzulaufen und dem synchronen Gange zuzustreben. Späterhin hat jedoch von Dobrowolski, der Chefelektriker der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, darauf hingewiesen, dass das zweiphasige magnetische Drehfeld nicht nur rotiert, sondern auch in der Stärke erheblichen Schwankungen unterworfen ist, also pulsiert. Nennt man die maximale Stärke eines Stromes i, wenn der Strom in der andern Spule gerade Null ist (Fig. 175 I), so hat eine Achtelperiode später (Fig. 175 II) jeder Strom die gleiche Stärke $i \cdot \sin 45$. Setzt man, was näherungsweise erlaubt ist, die erzeugten Feldstärken den Stromstärken proportional, und kombiniert man magnetische Felder in derselben Weise, wie man die Kräfte im Kräfteparallelogramm zusammensetzt, so sieht man, dass die magnetischen Feldstärken zwischen Werten schwanken, die sich wie

$$1 : 2 \cdot \sin 45 = 1 : 1{,}41$$

verhalten, also Unterschiede von 41 % aufweisen.

Eine solche pulsierende Feldstärke aber wirkt bremsend auf den im Felde rotierenden Anker, solange nicht der Synchronismus erreicht ist; die Zugkraft des Motors ist daher nur die Differenz zwischen dem Drehungsmoment, das vom rotierenden Felde ausgeübt wird, und der hemmenden Wirkung, die von den Pulsationen des Feldes herrührt.

4. Verkettung der Zweiphasenströme.

In den Abbildungen Fig. 173 und 175 I, II, ... VI haben wir die Spulengruppen, die wir mit $A_1 A'_1$ und $B_1 B'_1$, bezw. mit $A_2 A'_2$ und $B_2 B'_2$ bezeichneten, zunächst vollständig unabhängig gedacht und angenommen, dass die $A_1 A'_1$ der Stromerzeuger mit den $A_2 A'_2$ der Motoren, und ebenso die Spulen $B_1 B'_1$ mit den $B_2 B'_2$ durch getrennte Hin- und Rückleitungen verbunden seien. Wir haben in diesem Falle zwei völlig unabhängige Stromkreise, in denen zwei

unabhängige Wechselströme zirkulieren, die einen Phasenunterschied von 90° besitzen.

Man kann aber sowohl in den Zweiphasenmaschinen als in den Zweiphasenmotoren die beiden Wickelungen A A′ und B B′ an den Stellen, wo sich in Fig. 175 der Verbindungsdraht der Spulen A und A′ mit dem der Spulen B und B′ überschneidet, eine leitende Verbindung herstellen. Dann sind die beiden Spannungen und Ströme, wie der technische Ausdruck lautet, mit einander verkettet. Die Art der Verkettung, die in diesem Falle gewählt ist, führt den Namen »Sternschaltung«, und der Punkt, den die beiden Wechselstromkreise alsdann mit einander gemein haben, führt den Namen Nullpunkt der Verkettung.[1])

Sowohl wenn die Spulengruppen ganz unabhängig von einander sind, als auch wenn die Verkettung in Sternschaltung stattfindet, ist der Spannungsunterschied zwischen den Leitungen a und a′ (in

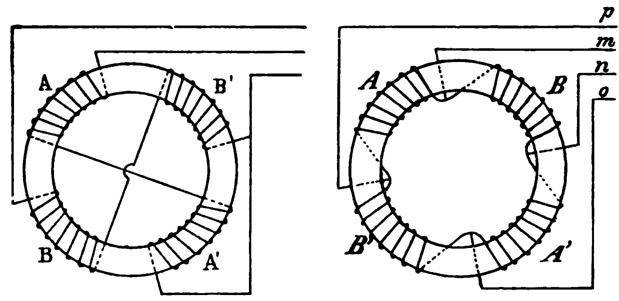


Fig. 176. Zweiphasensystem mit drei Leitungen. Fig. 177.

Fig. 173) zur Zeit t gleich 2 E sin ωt, und eben so gross ist der Spannungsunterschied zwischen den Leitungen b und b′. In dem Falle der Verkettung durch Sternschaltung ist der Spannungsunterschied zwischen den Leitungen a und b oder a′ und b′ oder a und b′ oder a′ und b, also überhaupt zwischen zwei Leitungen, die verschiedene Spannung führen, die Resultante zweier Wechselspannungen, die gleiche Maximalwerte E haben, die aber einen Phasenunterschied von 90° besitzen. Setzt man nach einem Vektordiagramm (vergl. Kap. I, Abschn. 4, S. 8, Fig. 4) zwei solche Spannungen zusammen, so ergiebt sich eine Resultante, die gleich $\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t \pm 45^0)$, d. h. 1,41 mal so gross als die Spannung zwischen den Enden einer Spule und um 45° in der Phase gegen beide Wechselspannungen verschoben ist. Der Spannungsunterschied zwischen den Enden einer

[1]) Fig. 173 stellt ein solches verkettetes System dar, wenn man sich denkt, dass sowohl am Punkte I, als am Punkte II, die sich überschneidenden Stromleiter mit einander in metallischer Berührung stehen.

der vier Spulen heisst **Phasenspannung** und der Spannungsunterschied zwischen zwei Enden zweier Spulen, die Ströme verschiedener Spannung führen, heisst **verkettete Spannung**. Die verkettete Spannung ist bei der Sternschaltung $\sqrt{2} = 1,41$ mal so gross als die Phasenspannung.

Bei dem in Fig. 176 dargestellten Falle, in dem nur eine gemeinsame Rückleitung bei dem Zweiphasensystem verwendet wird, ist die Spannung zur Zeit t zwischen einer der beiden äusseren Leitungen und der gemeinsamen Rückleitung gleich $2\,E \sin \omega\, t$, d. h. gleich dem doppelten des Spannungsunterschiedes, der an den Enden einer Spule herrscht. Zwischen den beiden Hinleitungen besteht der Spannungsunterschied $2\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin (\omega\, t + 45^0)$.

Um die mittleren, effektiven Spannungsunterschiede zu erhalten, braucht man nur die Sinusfunktionen in den vorher genannten Werten wegzulassen und die Maximalwerte durch $\sqrt{2}$ zu dividieren.

Bei dem in Fig. 176 dargestellten Falle des Zweiphasensystems mit drei Leitungen ist die Stromstärke in der mit zwei Spulen verknüpften Leitung $\sqrt{2}$ mal so gross als die Stromstärke in jeder Spulenwindung und in den beiden anderen Leitungen.[1])

Ausser der Verkettung durch Sternschaltung sind aber auch noch andere Arten der Verkettung möglich; es können z. B. die beiden Wickelungssysteme A B, A′B′ hinter einander geschaltet und von den vier Vereinigungspunkten vier Leitungen abgeführt werden. (Vergl. Fig. 177.) Eine derartige Verkettung nennt man **geschlossene Schaltung, Ringschaltung** oder **Kranzschaltung**. Auch diese Art der Verkettung ist sowohl für Stromerzeuger, als für Motoren und für Transformatorenwickelungen anwendbar.

Der effektive Spannungsunterschied zwischen zwei Enden einer Spule, also z. B. zwischen p und m, zwischen m und n, n und o oder o und p ist die Phasenspannung $\frac{E}{\sqrt{2}}$. Zwischen n und p oder zwischen m und o herrscht dagegen die verkettete Spannung $\frac{\sqrt{2} \cdot E}{\sqrt{2}} = E$, die gegen die Phasenspannungen um 45^0 vor- oder nacheilt.

5. Elektromotoren für Zweiphasenstrom.

Wir erwähnten schon, dass man vielfach sowohl die Synchronmotoren als asynchrone Motoren für einphasigen Wechselstrom dadurch zum Angehen bringt, dass man den zugeführten einphasigen

[1]) Gleiche Belastung der Zweige durch Bogen- und Glühlampen vorausgesetzt, falls auch solche zwischen die Leitungen eingeschaltet sind.

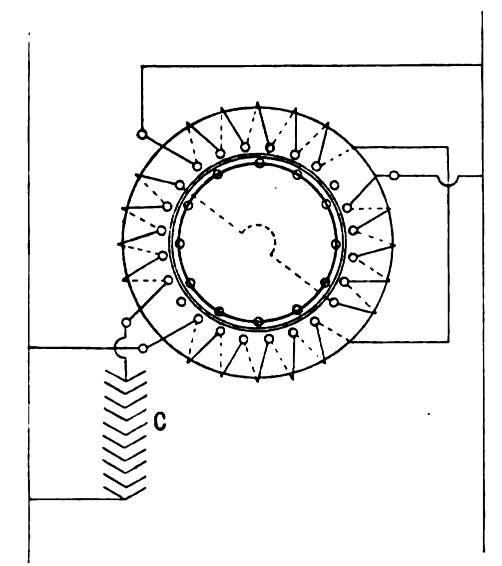


Fig. 178. Schaltung eines Zweiphasenmotors, der mit gewöhnlichem Wechselstrom gespeist wird.



Fig. 179. Zweiphasenmotor von Brown, Boveri & Cie.

Strom in zwei Teile verzweigt und den beiden Teilen, durch Einschaltung von Selbstinduktion mittels einer Drosselspule oder von Kapazität, eine Phasendifferenz erteilt; diese beiden Ströme werden durch getrennte Feldwickelungen gesendet, die ein zweiphasiges Drehfeld erzeugen. Sowohl Ferraris als Tesla, die zuerst Drehfeldmotoren konstruierten, haben bereits von diesem Kunstgriffe Gebrauch gemacht.

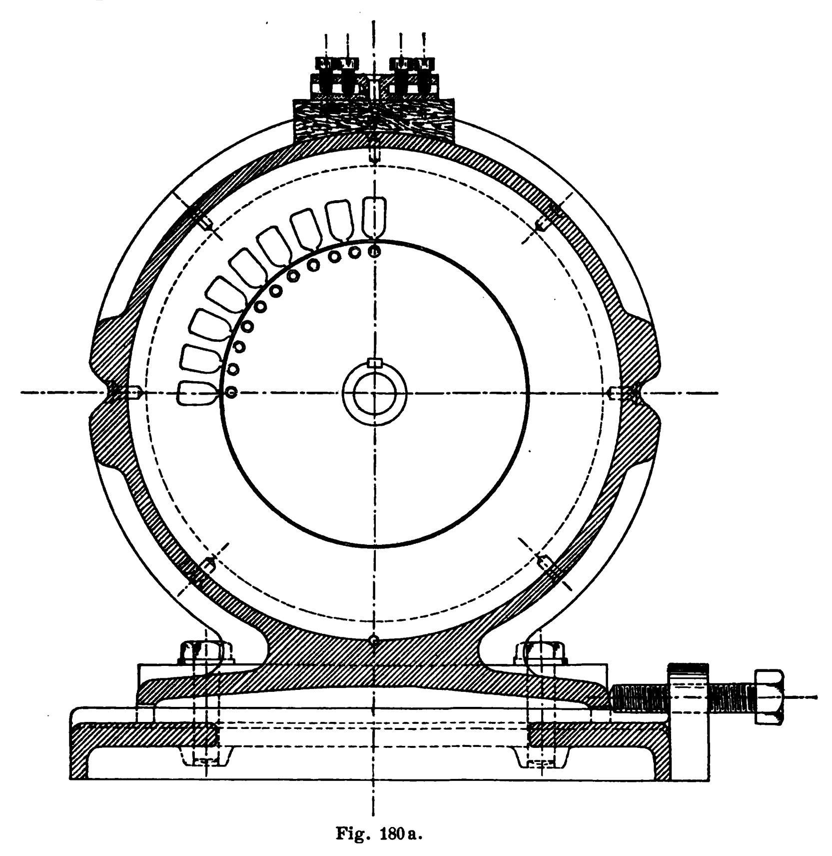


Fig. 180 a.

Die Fig. 178 erläutert Einrichtung und Schaltung eines Zweiphasenmotors mit Kurzschlussanker, der von einer Leitung aus betrieben wird, die gewöhnlichen Wechselstrom führt. Der Phasenunterschied in den beiden um 90° gegen einander versetzten Wickelungen wird im vorliegenden Falle dadurch bewerkstelligt, dass die eine Wickelung mit einem Teile dieses Wechselstromes gespeist wird, während die andere Wickelung in eine Abzweigung

eingeschaltet ist, in der sich eine auf elektrischem Wege erzeugte Kapazität C befindet.

Tesla hat ausserdem (1888) gezeigt, dass man auch bei Energieübertragung mit zweiphasigem Wechselstrom mit nur drei Drähten auskommen kann, indem man für beide Wechselströme eine gemeinschaftliche im Verhältnis von 1 : 1,4 stärker dimensionierte Rückleitung benutzt. Die Fig. 176 erläutert, in welcher Weise dann die Verbindungen mit den vier Wickelungen hergestellt werden können.

Die Elektromotoren, die durch diese Maschinen betrieben werden, sind entweder gewöhnliche Teslamotoren mit zweiphasigem magne-

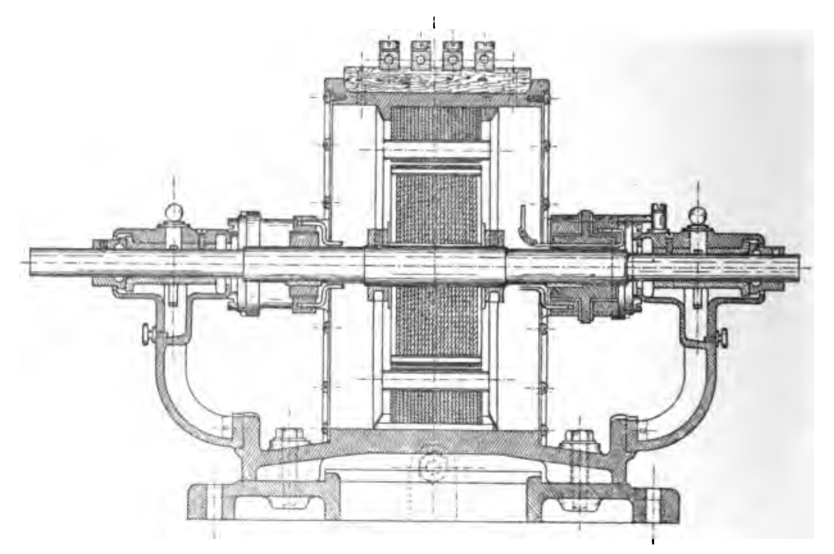


Fig. 180 b.

tischen Drehfelde und Kurzschlussankern, oder zwei, in gleicher Weise wie die Stromerzeuger mit einander verbundene, Synchronmotoren.

Auf europäischem Boden hat sich besonders Brown mit der Ausbildung des Zweiphasensystems beschäftigt.

Die Einrichtung eines solchen Zweiphasenmotors kann aus Fig. 179 ersehen werden. Der induzierende Teil zeigt dieselbe Anordnung wie der feststehende Anker der Stromerzeuger, den wir in Kap. VI, Abschn. 11 auf S. 175 abgebildet haben. Man kann deutlich die in zwei Ebenen angeordneten A- und B-Spulen unterscheiden. In dem Hohlcylinder, der den induzierenden Teil bildet, bewegt sich

jedoch bei den Motoren eine aus isolierten Eisenblechen hergestellte Trommel mit Kurzschlusswickelung[1]) oder ein Phasenanker.[2])

Die Zuleitung der beiden Arbeitsströme zu den ruhenden Wickelungen der Feldmagnete erfolgt durch die in der Abbildung sichtbaren Anschlussklemmen.

Fig. 180 a und 180 b stellt zwei Durchschnitte eines kleinen Zweiphasenmotors für eine halbe Pferdestärke dar, der von der Aktien-Gesellschaft Dresdener Elektrizitätswerke (vormals Kummer & Co.) herrührt und von Fischinger konstruiert ist.

Der Ankerdurchmesser desselben hat eine Grösse von 136 *mm*. Der Luftzwischenraum zwischen Ankereisen und Oberfläche des Feldeisens beträgt nur 1 *mm*. Bei 1440 Umläufen in der Minute ist der Energieverbrauch des Motors ungefähr 560 Watt. Beträgt die verkettete Spannung etwa 240 Volt, so trägt die Wickelung des ruhenden Teiles, des Ständers, 704 Windungen in 32 Nuten. Der Draht ist 1,1 *mm* dick. Der Widerstand dieses Teiles beträgt 6 Ohm. Der zugehörige Läufer hat 240 Gesamtwindungen in 48 Nuten. Die Drahtstärke beträgt 1,2 *mm*.

---

[1]) Nach Angaben des Herrn von Dobrowolski können Kurzschlusswickler auch aus massivem Eisen hergestellt werden.

[2]) Über die in konstruktiver Hinsicht wichtigen Einzelheiten des in Fig. 179 abgebildeten Zweiphasenmotors hatten die Herren Brown, Boveri & Cie. die Liebenswürdigkeit, uns folgende Angaben zur Verfügung zu stellen: Leistung 160 Pferdestärken. Polzahl 10. Umlaufzahl 480. Verkettete Spannung 1000 V. Stromstärke 80 Ampère.

Ständer: 400 Drähte von 30 *qmm* Querschnitt; Eisenquerschnitt 850 *qcm*.

Läufer: 270 Drähte von 100 *qmm* Querschnitt; Eisenquerschnitt 750 *qcm*.

Die im Läufer beobachtete Stromstärke betrug 180 Ampère und die an den Enden der Phasenwickelung gemessene Spannung 420 Volt.

9. Kapitel.

Die Drehstrommotoren.

1. Arbeitsleistung beim Drehstromsystem.

Ein umlaufendes magnetisches Feld mit erheblich grösserer Gleichmässigkeit, d. h. mit viel geringeren An- und Abschwellungen der Stärke des Magnetfeldes, als bei Verwendung von zwei in der Phase verschobenen Wechselströmen, erhält man durch Anwendung von drei Wechselströmen, die einen Phasenunterschied von je 120^0 besitzen. In Fig. 181 sind drei solche Wechselströme abgebildet und

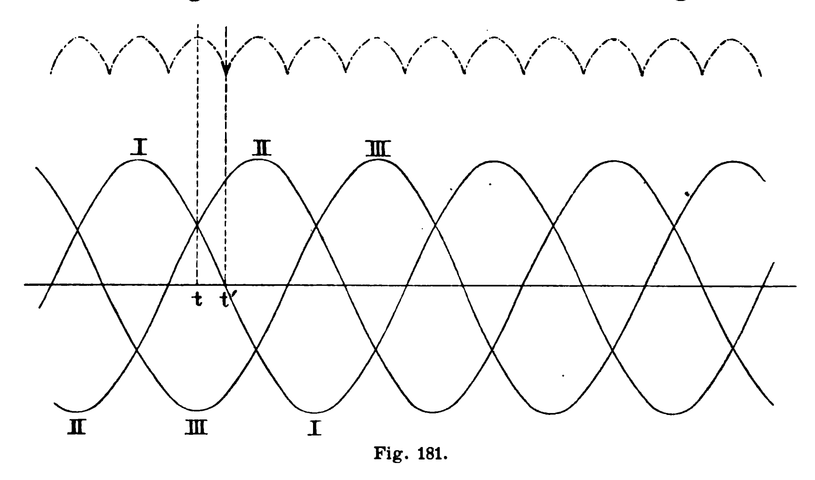


Fig. 181.

unmittelbar darüber sind die Schwankungen der Feldstärke dargestellt.

Zu dem Zeitpunkte t', der in der Figur dem Momente entspricht, in dem die Feldstärke ein Minimum ist, beträgt die Stromstärke

$$2 \cdot J \cdot \sin 60 = 1{,}73 \cdot J,$$

wenn man mit J die maximale Stromstärke bezeichnet; im Zeitpunkte t, zu der die Summe der Stromstärken ihr Maximum erreicht, hat diese Summe den Wert

$$J \cdot \sin 30 + J + J \cdot \sin 30 = 2\, J.$$

Die Schwankung in der Summe der magnetomotorischen Kräfte beträgt nunmehr bloss knapp 17 %, gegen 41 % bei einem Drehfeld, das durch zwei um 90° in der Phase verschobene Wechselströme erzeugt wird.

Man erkennt aus dem oberen Teil der Fig. 181, dass in einer vollen Periode jedes solchen Wechselstromes sechs solcher Maxima der Feldstärke stattfinden.

Selbstverständlich wirken auch diese An- und Abschwellungen noch störend und veranlassen die Entstehung von sekundären Induktionsströmen von der Periode 6 ~ und diese wieder die Bildung von sekundären Magnetfeldern; aber es wird immerhin durch Anwendung von drei in der Phase verschobenen Wechselströmen ein erheblicher Vorteil erzielt.

Besonders wertvoll ist auch der Umstand, auf den wir bereits früher (vgl. Kap. VI, Abschn. 1, S. 154) hingewiesen haben, dass in jedem Augenblicke die algebraische Summe der drei Ströme gleich Null ist, so dass man mit im ganzen drei Leitungen auskommen kann, wenn sowohl im Stromerzeuger, als in dem mit Drehstrom betriebenen Motor, drei Leitungen in je einem Punkte, dem Nullpunkte der Verkettung, mit einander verbunden werden. (Vergl. Fig. 182.)

Fig. 182. Sternschaltung bei Dreiphasenmaschinen.

Bei einer solchen Verkettung der drei Ströme, die gleichzeitig von Bradley, Wenström, Haselwander und von Dolivo-Dobrowolski erfunden worden ist, dienen immer die beiden anderen Drähte als Rückleitung für den in dem einen Drahte verlaufenden Wechselstrom.

Wenn nicht nur Dreiphasenmotoren, sondern auch Lampen von einem solchen Dreileitersystem aus betrieben werden sollen, so müssen die Lampen sowohl zwischen die Leitung I und II, als zwischen II und III und III und I, und zwar in möglichst gleicher Zahl und Stärke, eingeschaltet werden, wenn man wirklich mit nur drei Drähten auskommen will.

Da es nun häufig schwierig ist, die genau gleiche Lampenzahl zwischen jedem Paare der drei Leitungen zu jeder Zeit in Thätigkeit zu halten, so wird auch nicht immer die algebraische Summe der drei Ströme genau Null sein.

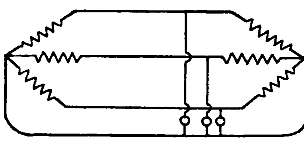
In Fällen, wo gelegentlich erhebliche Unterschiede auftreten können, wird man durch einen vierten Leiter (den Ausgleich- oder Nullleiter) die Verkettungspunkte mit einander verbinden. (Vgl. Fig. 183.)

Ist ein solcher Ausgleichsleiter vorhanden, so wird man die Lampen zwischen jeder der drei Hauptleitungen und diesem Ausgleichsleiter einschalten.

Wenn wir bei offener Schaltung oder Sternschaltung (vergl. Fig. 184) zwischen zwei Leitungen einen Spannungsmesser und in eine der beiden Aussenleitungen einen Strommesser einschalten, so misst zwar das eingeschaltete Ampèremeter richtig den in der Leitung fliessenden Strom, das Voltmeter jedoch misst nicht die in D vorhandene Phasenspannung E, sondern die zwischen den Leitungen C und D herrschende Spannung E', die sogenannte verkettete Spannung. Diese Hauptspannung E' ist aber die Resultante aus zwei EMKräften, zwischen denen ein Phasenunterschied von 120° besteht. Es ist also (vergl. Fig. 122):

$$E' = E\sqrt{3}.$$

Die Leistung einer Phase ist dann $\frac{E' \cdot J \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}}$ und die Leistung der drei Phasen zusammen ist gleich $\frac{3\,E' \cdot J \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}}$, wenn φ die Phasenverschiebung des Stromes J gegen die in demselben Drahte, in dem J fliesst, herrschende EMK bedeutet.


Fig. 183. Sternschaltung mit Ausgleichleiter.

Anders ist es bei der geschlossenen Schaltung oder Dreieckschaltung. (Vergl. Fig. 185.) Das zwischen die Punkte C und D geschaltete Voltmeter giebt dann unmittelbar die Phasenspannung E an; der Strommesser aber zeigt nicht mehr die in einer der Wickelungen des Stromerzeugers oder Motors wirklich fliessende Stromstärke J, sondern die eines Aussenleiters, also J' an. J' aber setzt sich nach den Kirchhoff'schen Sätzen aus zwei gleichen Wechselströmen von der Grösse J zusammen, die um 120° gegen einander in der Phase verschoben sind. Es ist dann:

$$J' = J \cdot \sqrt{3}.$$

Die Leistung einer Phase ist dann $\frac{J' \cdot E \cos\varphi}{\sqrt{3}}$ und die Gesamtleistung $\frac{3 \cdot J' E \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}}$.

2. Die Vorzüge des Drehstromsystems.

Die Verkettung der Ströme hat den Vorteil, dass dadurch die Stromstärke und bei gleichem Aufwande an Leitungsmaterial die Energieverluste durch Stromwärme erheblich vermindert werden. [1]) Bei gleicher Arbeitsleistung verhalten sich die Stromstärken bei

[1]) Man vergleiche die Abhandlung von Hans Görges, ETZ 1895, S. 46.

einphasigem Wechselstrom I_W, bei Zweiphasenstrom J_z und bei Drehstrom J_D wie:

$$I_W : J_z : J_D = 1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{\sqrt{3}} = 1 : 0{,}5 : 0{,}58.$$

Die Ankerrückwirkung, durch die vorzugsweise die Belastungsfähigkeit eines Stromerzeugers bedingt wird, und die Streuung hängen ebenfalls von der Stromstärke ab und sind ihr nahezu proportional. Auch von diesem Standpunkte aus stehen daher die Mehrphasenmaschinen den mit einphasigem Strome betriebenen Vorrichtungen nicht nach. Ferner wird bei dem Mehrphasenstrom das Material besser ausgenutzt. Bei gleicher magnetischer Beanspruchung der von Kraftlinien durchsetzten Eisenteile und gleicher Leistung stehen z. B. die erforderlichen Eisenmengen in nachfolgendem Verhältnis:

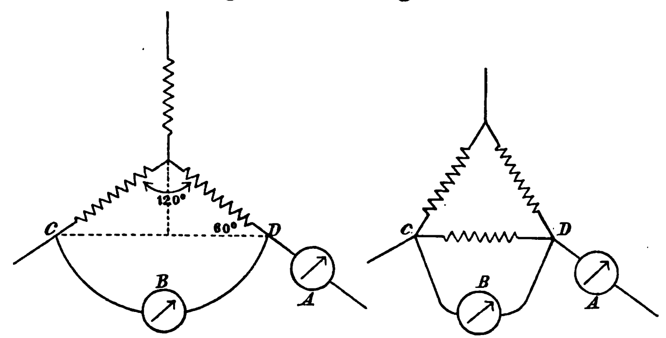


Fig. 184. Messungen bei Sternschaltung. Fig. 185. Messungen bei Dreieckschaltung.

bei einphasigem Wechselstrom	1
» Zweiphasenstrom	0,71
» Dreiphasenstrom	0,67.

Was die Gewichte des Leitungsmateriales betrifft, so findet man, dass bei gleichen Betriebsspannungen, Verlusten und Leistungen sich die erforderlichen Kupfermengen verhalten:

bei Wechselstrom		bei Zweiphasenstrom		bei Dreiphasenstrom	
Zweileiter	Dreileiter[1])	Dreileiter	Vierleiter	Dreileiter	Vierleiter[1])
100	31,3	72,8	100	75	29,2.

Bei Kabeln ist die Vereinigung von vier Leitern selbstverständlich wesentlich unbequemer, als die Unterbringung von zwei oder drei isolierten Leitern in einem Strang.

Bei Zweiphasenstrom mit drei Leitungen tritt zwischen den beiden nicht kombinierten Leitungen ein Spannungsunterschied auf, der

[1]) Der Ausgleichsleiter ist halb so stark angenommen, wie die beiden Aussenleiter. Wenn die Belastung der Zweige gelegentlich grosse Unterschiede zeigt, muss der Ausgleichleiter wesentlich stärker gewählt werden.

$\sqrt{2}$ mal grösser ist, als die Betriebsspannung; die Isolation wird daher bei dem Zweiphasensystem mit drei Leitungen (vergl. Kap. VIII, Abschn. 4, S. 247 u. s. f.) im Verhältnis von 1 : $\sqrt{2}$ stärker beansprucht.

Auch die Mehrphasenmotoren sind den Wechselstrommotoren nicht unerheblich überlegen.

Die Mehrphasenmotoren gehen von selbst mit Belastung an, während die Einphasenmotoren, sowohl die synchronen, als die asynchronen, erst durch besondere Hilfsvorrichtungen auf eine dem Synchronismus nahekommende Geschwindigkeit gebracht werden müssen.

Da beim Einphasenmotor das Drehfeld nur unter der Wirkung der im Anker fliessenden Ströme entstehen kann, so dürfen diese niemals Null werden, auch nicht, wenn der Motor unbelastet läuft. Die Ankerströme beim Mehrphasenmotor sind geringer, denn sie sind beim Leerlauf fast Null, da dann im Anker fast keine Ströme entstehen; bei Belastung sind die Ankerströme ungefähr dem Quadrate des Tourenverlustes (der Schlüpfung) proportional. Der Tourenverlust ist aber wiederum der Arbeitsleistung des Drehstrommotors proportional.

Thatsächlich ist beim Einphasenmotor der Verlust durch Stromwärme etwas mehr als doppelt so gross, als beim Drehstrommotor.

Schaltet man z. B. beim Zweiphasenmotor den einen Strom aus, so muss man, um dieselbe Leistung hervorzubringen, die Stromstärke in der anderen Leitung verdoppeln, dadurch wächst der Verlust durch Stromwärme und gleichzeitig die Streuung. In der Praxis hat sich gezeigt, dass ein einphasiger Wechselstrommotor von ungefähr gleichem Gewichte wie ein Mehrphasenmotor nur ungefähr 70% von der Leistung des letzteren hervorzubringen imstande ist und einen um mehrere Prozente geringeren Wirkungsgrad besitzt.

Wenn bei Drehstromanlagen infolge verschiedener Lampenzahl und -Grösse die einzelnen Seiten ungleich belastet werden, so kann man, um die entstehenden Spannungsunterschiede auszugleichen, wie bereits oben erwähnt wurde, bei Sternschaltung sich eines vierten Drahtes bedienen, der vom Verkettungspunkte ausgeht. (Patent der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.) Man kann aber auch nur da, wo an den Verbrauchsstellen erhebliche Unterschiede in der Belastung auftreten können, einen vierten Ausgleichsleiter anwenden und diesen zu dem Verkettungspunkte eines Drehstromtransformators führen, dessen drei Kerne nur mit je einer Wickelung versehen sind, die in Sternschaltung verkettet sind. (Patent von Siemens & Halske.)

Nach alledem sind die Vorzüge des Drehstromes gegenüber dem einphasigen Wechselstrome und dem Zweiphasensystem etwa in folgenden Sätzen zusammen zu fassen:

Die Dreiphasengeneratoren gestatten, das Material besser auszunutzen, d. h. Dreiphasenmaschinen sind bei gleicher Leistung billiger, weil der Wickelungsraum besser ausgenutzt werden kann. Diese Maschinen geben unausgesetzt, und nicht periodisch, wie die Wechselstrommaschinen, Energie nach aussen ab.

Die Verluste durch Stromwärme sind unter sonst gleichen Verhältnissen bei diesen Maschinen am geringsten, weil die Stromstärken geringer sind.

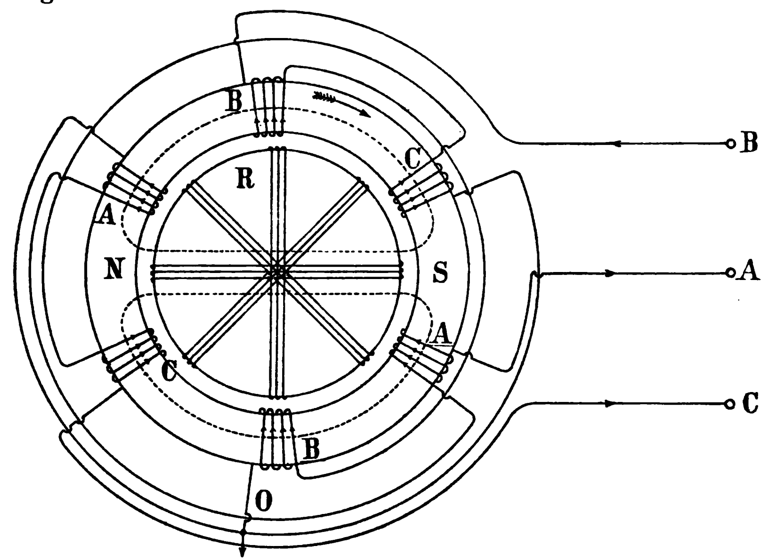


Fig. 186. Schematische Darstellung eines Drehstrommotors.

Die Leitungen fallen bei diesem Systeme billiger aus.

Die Drehstrommotoren gehen ohne besondere Hilfsvorrichtungen von selbst, auch mit Belastung, an und können leicht umgesteuert werden; sie sind billiger und besitzen günstigeren Wirkungsgrad als Einphasen- und Zweiphasenmotoren.

Die Regulierung auf konstante Spannung ist bei diesem Systeme einfach, der Spannungsabfall durch die Rückwirkung der Motoren ist geringer, und die Leerlaufstromstärke der Motoren kann in engeren Grenzen gehalten werden, als bei Motoren der anderen Systeme. Als weiterer Vorteil ist es ferner anzusehen, dass Drehstrommotoren ganz ohne Schleifringe und Bürsten mit nur festen stromführenden Leitern hergestellt werden können.

3. Theorie der Dreiphasenmotoren nach E. Arnold.

Wir gehen, einer Darstellung von E. Arnold[1]) folgend, von einer schematischen Figur eines Drehstrommotors aus. (Vgl. Fig. 186.) Derselbe ist zweipolig und die drei Phasen A B C schliessen Winkel von 120° mit einander ein. Die Feldwickelung des äusseren Ringes besteht aus sechs Spulen; zwei gegenüberliegende Spulen gehören zu derselben Phase, so dass die Phasendifferenz der Ströme zweier benachbarter Spulen 60° beträgt. Der Anker R enthält vier in sich geschlossene Spulen, die je einen Winkel von 45° mit einander einschliessen. Die in den vier kurzgeschlossenen Windungen von dem Drehfelde induzierten Ströme haben daher in je zwei benachbarten Spulen eine Phasendifferenz von 45°.

Wir nehmen an, dass die Feldstärken (Anzahl der Kraftlinien in 1 *qcm*) den Strömen $J \cdot \sin \omega t$ proportional sind, was für geringe Sättigungen bekanntlich zulässig ist. Dann können die Grössen: L_1, der Selbstinduktionskoëffizient einer Phase der Feldwickelung, und L_2, der Selbstinduktionskoëffizient einer Phase der Ankerwickelung und M, der Höchstwert der gegenseitigen Induktion einer primären und einer sekundären Phase, als konstant angesehen werden. Nennen wir h_1 die maximale Feldstärke, die eine Phase der Feldwickelung hervorruft, und wenden wir, was näherungsweise (aber auch nur näherungsweise) zulässig ist, auf die von den drei Strömen erzeugten Felder die Regeln des Parallelogramms der Kräfte an, so können wir die zu einer beliebigen Zeit t vorhandenen drei Feldstärken in je drei Komponenten nach zwei aufeinander senkrechten Achsen, einer X Achse in der Richtung NS und einer dazu senkrechten Y Achse, zerlegen.

Dann ist die Summe der Felder in der X Achse $h_1 \sin \omega t - h_1 \cos 60 \cdot \sin(\omega t - 120) - h_1 \cdot \cos 60 \sin(\omega t - 240) = \frac{3}{2} h_1 \sin \omega t$ und die Summe der Felder in der Y Achse $h_1 \cdot \cos 30 \cdot \sin(\omega t - 120) - h_1 \cos 30 \cdot \sin(\omega t - 240) = -\frac{3}{2} h_1 \cos \omega t$. Das resultierende Feld H_1 wird:

$$H_1 = \sqrt{(\tfrac{3}{2} h_1 \cdot \sin \omega t)^2 + (-\tfrac{3}{2} h_1 \cdot \cos \omega t)^2} = \tfrac{3}{2} h_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Das resultierende Magnetfeld ist somit konstant und unabhängig von der Zeit und rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \sim$ (wenn $\sim$ die Zahl der Perioden in 1 Sekunde bezeichnet).

In der Abbildung 186 sind die Stromrichtungen zur Zeit t mit Pfeilen bezeichnet. Nimmt z. B. der Strom in A ab und in B zu, so rotiert das Feld in der Richtung des Uhrzeigers.

---

[1]) E. Arnold, Die Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrommotoren, Zeitschrift für Elektrotechnik, Heft I bis VII, Jahrgang 1894.

Findet keine Streuung statt, treten also alle von der Feldwickelung erzeugten Kraftlinien in das Ankereisen ein, so ist:

$$f_2 \cdot H_1 = \tfrac{3}{2} J_1 \cdot M \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

wenn man mit f_2 die Fläche, die von einer Ankerwindung umfasst wird, und mit J_1 den Maximalwert des primären Stromes bezeichnet.

Die magnetische Wirkung der drei periodischen Stromstärken des Drehstromes können wir uns durch diejenige einer konstanten Stromstärke J_1 ersetzen, die mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotiert.

a) Die Vorgänge im ruhenden Anker, die Anlaufsperiode.

Das Drehfeld H_1 induziert in den Windungen des zunächst feststehend gedachten Ankers Wechselströme. Die Maximalstärke derselben wollen wir mit J_2 bezeichnen.

Jede Ankerwickelung erzeugt nun ein periodisch veränderliches Magnetfeld, dessen maximale Feldstärke h_2 sein mag. Die Phasenunterschiede dieses Feldes sind $\frac{\pi}{m_2}$, wenn m_2 die Anzahl der in gleichem Winkelabstand auf dem Anker angebrachten Kurzschlusswickelungen bezeichnet.

Die im Anker induzierten Ströme erzeugen ebenfalls ein mit derselben Winkelgeschwindigkeit ω rotierendes konstantes Magnetfeld von der Stärke $\frac{m_2 h_2}{2}$, das aber um einen Winkel $\frac{\pi}{2} + \varphi_2$ hinter dem im äusseren Ringe erzeugten rotierenden Magnetfeld zurückbleibt.

Auch das im Anker entstehende magnetische Drehfeld können wir uns durch die in einer der Kurzschlusswickelungen wirkende konstante Stromstärke $\frac{m_2 J_2}{2}$ ersetzt denken, die um den Winkel φ_2 gegen das primäre Feld zurückbleibt und mit diesem rotiert.

Die EMK, die in der Feldwickelung thätig ist, muss nun drei elektromotorischen Kräften das Gleichgewicht halten:

1. Dem Spannungsverlust $J_1 \cdot w_1$, den der zugeführte Drehstrom in dem Widerstand w_1 jeder Feldwickelung veranlasst.

2. Der durch das primäre Drehfeld induzierten EMK, deren maximale Grösse $\frac{3}{2} \cdot J_1 \cdot L_1 \cdot \omega$ ist. Diese ist gegen $J_1 \cdot w_1$ um 90^0 verschoben.

3. Der durch das im Anker entstandene Drehfeld induzierten elektromotorischen Gegenkraft, deren Höchstwert

$$\frac{m_2}{2} \cdot \omega M J_2$$

ist, und die gegen die in 2. genannte EMK eine Phasenverschiebung

um den Winkel $\frac{\pi}{2} + \varphi_2$ besitzt. Diese drei EMKräfte setzen wir nach einem Vektordiagramm zusammen. (Vergl. Fig. 187.)

Wir machen $\overline{AB} = W_1\ J_1$, senkrecht dazu konstruieren wir $\overline{BC} = \frac{3}{2}\ \omega\ J_1\ L_1$ und tragen unter dem Winkel $\frac{\pi}{2} + \varphi_2$ die Strecke $CD = \frac{m_2}{2}\ \omega\ J_2\ M$ auf.

Dann bestimmt die Schlusslinie AD nach Grösse und Richtung den Maximalwert E_1 der primären EMK; φ_1 ist der Winkel der Phasenverschiebung zwischen der primären Stromstärke J_1 und der primären EMK von der Grösse E_1.

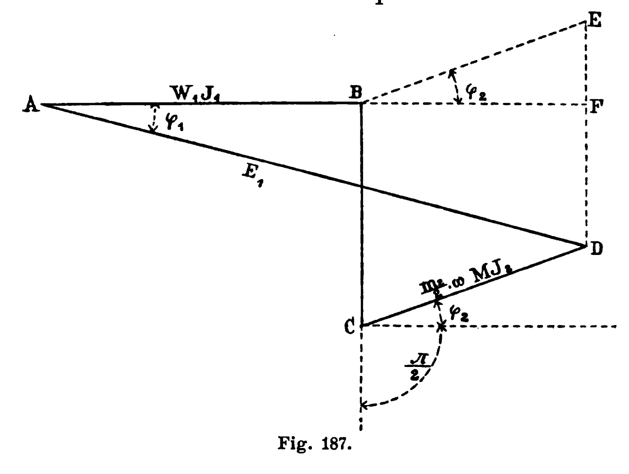


Fig. 187.

Das primäre Drehfeld induziert im Anker eine EMK von der maximalen Grösse:

$$E_2 = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot M \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Diese EMK hält zwei anderen EMKräften das Gleichgewicht:

1. Dem Spannungsverlust, der in einer Kurzschlusswickelung des Ankers vom Widerstande W_2 durch den Strom J_2 hervorgebracht wird. Er beträgt: $W_2\ J_2$.

2. Der einen Phasenunterschied von 90^0 dagegen besitzenden EMK, die das sekundäre Drehfeld in jeder Kurzschlusswickelung des Ankers induziert; diese hat den Wert

$$\frac{m_2}{2} \cdot \omega\ L_2\ J_2$$

Diese drei E M Kräfte, E_2 und die beiden eben genannten Gegenkräfte, können also in einem rechtwinkligen Dreieck zusammengesetzt werden, dessen Hypotenuse E_2 ist. (Vergl. Fig. 188.)

Aus diesem Dreieck kann man sofort folgende drei Gleichungen ablesen:

$$\cos \varphi_2 = \frac{W_2}{\sqrt{W_2{}^2 + \left(\frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot L_2\right)^2}}$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{\frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot L_2}{\sqrt{W_2{}^2 + \left(\frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot L_2\right)^2}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 4)$$

Fig. 188.

$$J^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot J_1}{\sqrt{W_2{}^2 + \left(\frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot L_2\right)^2}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 5)$$

Die im Anker in jeder Sekunde induzierte Arbeit in Watt ist:

$$A_2 = \frac{m_2}{2} \cdot W_2 \cdot J_2{}^2 = \frac{9 \cdot m_2 \cdot \omega^2 \cdot M^2 \cdot J_1{}^2 \cdot W_2}{8 \cdot \left\{W_2{}^2 + \left(\frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot L_2\right)^2\right\}} \quad . \; 6)$$

Dividieren wir diese Arbeit durch die Winkelgeschwindigkeit ω, so finden wir das Drehungsmoment, das auf den ruhenden Anker ausgeübt wird, oder das Anzugsmoment D. Dasselbe ist:

$$D = \frac{9}{8} \cdot m_2 \cdot \frac{\omega \cdot M^2 \cdot J_1{}^2 \cdot W_2}{W_2{}^2 + \left(\frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot L_2\right)^2} \quad . \; . \; . \; 7)$$

Der Widerstand W_2 einer Kurzschlusswickelung ist nun meist eine so kleine Grösse, dass man ohne merklichen Fehler im Nenner $W_2{}^2$ vernachlässigen kann.

Dann wird:

$$D = \frac{9}{2} \cdot \frac{M^2 \cdot J_1^2 \cdot W_2}{m_2 \cdot \omega \cdot L_2^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

Ist keine Streuung vorhanden, so ist bekanntlich

$$M^2 = L_1 L_2.$$

Kommen jedoch nicht alle, sondern nur der b^{te} Teil der im Feldmagneten erzeugten Kraftlinien wirklich an den Windungen des Ankers zur Geltung, so ist

$$M^2 = b^2 \cdot L_1 \cdot L_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 9)$$

Berücksichtigt man dies, so ist:

$$D = \frac{9}{4} \cdot \frac{b^2 \cdot L_1 \cdot J_1^2 \cdot W_2}{m_2 \cdot \omega \cdot L_2} \quad \ldots \ldots \quad 10)$$

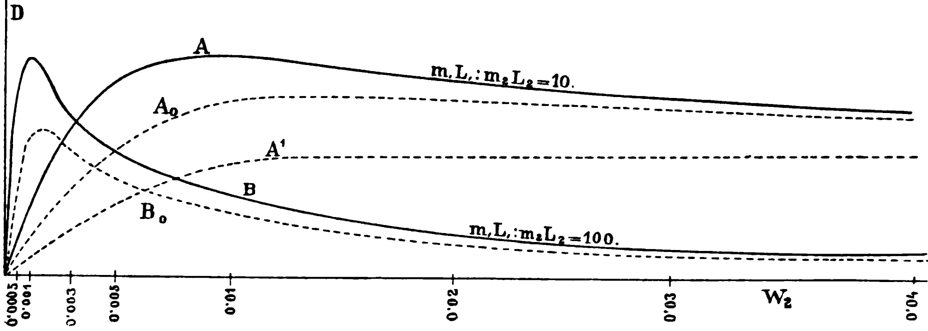


Fig. 189. Anzugsdrehungsmoment für verschiedene Verhältnisse $m_1 L_1 : m_2 L_2$ und Widerstände W_2, ohne und mit (gestr. Linie) Streuung.

Da der Streuungskoëffizient $b < 1$ sein muss und b im Zähler im Quadrate auftritt, so erkennt man daraus, dass mit zunehmender Streuung (d. i. mit abnehmendem b) das Drehungsmoment D kleiner wird.

Es ist nun klar, dass $3 L_1$ die Summe der Selbstinduktionen der Feldwickelung, $m_2 L_2$ die Summe der Selbstinduktionen der Ankerwickelung ist. Man erkennt, dass die Grösse von D wesentlich von dem Betrage von $\frac{3 L_1}{m_2 L_2}$ abhängt und ausserdem von der Grösse des Widerstandes W_2 einer Kurzschlusswickelung des Ankers.

E. Arnold hat die Grösse von D als Funktion von W_2 für verschiedene Werte des erstgenannten Verhältnisses berechnet und graphisch dargestellt. (Vergl. Fig. 189.)

Die ausgezogenen Kurven beziehen sich auf den Fall, dass keine magnetische Streuung vorhanden ($b = 1$) ist; die gestrichelten Kurven A_0 und B_0 gelten für solche Werte der Streuung, wie sie in der

Praxis vorkommen. Die Kurve A′ gilt für den Fall, dass $\frac{3 L_1}{m_2 L_2} = 10$ und sehr starke Streuung vorhanden (b klein) ist.

Man sieht, dass der Einfluss der Streuung um so mehr verschwindet, je grösser der Widerstand W_2 wird.

Das Drehungsmoment des Anlaufs des Ankers erreicht in jedem Falle für einen bestimmten Wert von W_2 ein Maximum, dieser Wert von W_2 ist um so kleiner, je grösser das Verhältnis $\frac{m_1 L_1}{m_2 L_2}$ ist. Bei einem Transformator würde dieses Verhältnis mit dem Umsetzungsverhältnis $\frac{N_1}{N_2}$ übereinstimmen.

Für die Güte eines Mehrphasenmotors ist es nun besonders wichtig, dass eine möglichst hohe Anzugskraft, d. i. ein möglichst grosses Drehungsmoment des ruhenden Ankers mit möglichst geringem Wattverbrauche, also möglichst kleiner Stromstärke, geleistet wird. Ist nämlich die beim Ingangsetzen des Motors erforderliche Erregerstromstärke sehr gross, so wird dadurch die Streuung im Motor sowohl, als in der den Strom liefernden Quelle, sei dies eine Maschine oder ein Transformator, sehr gross, und die Streuung und das Ansteigen der Stromstärke an sich veranlasst einen sehr bedeutenden Abfall der primären Spannung; sind gleichzeitig Lampen an die Stromquelle angeschlossen, durch die die primäre Stromstärke geliefert wird, so wird sich der Spannungsabfall, wenn die Stromquelle nicht eine sehr grosse Kapazität besitzt, ungemein störend durch Sinken der Helligkeit der Lampen bemerklich machen.

Bei ungünstiger Anordnung des Motors kann es, da der Erregerstrom gegen den Nutzstrom um 90^0 in der Phase verschoben ist, dahin kommen, dass, um die erforderlichen Watt hervorzubringen, die zum Anlaufen des Motors erforderliche Stromstärke mehrmals so gross ist, als die zum regelmässigen Betrieb des belasteten Motors erforderliche Stromstärke. Dies würde dann unwirtschaftlich dicke Zuleitungen, stärkere Ausschalter, grössere Messinstrumente u. s. w. nötig machen.

Aus der für D gegebenen Formel 7) kann J_1 berechnet werden, und zwar ist:

$$J_1 = \sqrt{\frac{8}{9 m_2} \cdot \frac{D\left[W_2^2 + \frac{m_2^2}{4} \omega^2 L_2^2\right]}{b^2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \omega \cdot W_2}} \quad \ldots \quad 11)$$

Man kann nun zwei Fälle unterscheiden:

1. Der Widerstand W_2 sei klein im Vergleich zu ωL_2, dann ist näherungsweise:

$$J_1 = \sqrt{\frac{2\,m_2}{9\,b^2} \cdot \frac{D \cdot \omega L_2}{W_2 \cdot L_1}}$$

oder es ist:

2. umgekehrt ωL_2 klein im Vergleich zu W_2, dann ist angenähert:

$$J_1 = \sqrt{\frac{8}{9\,b^2 \cdot m_2} \cdot \frac{D \cdot W_2}{\omega \cdot L_1 \,.\, L_2}}.$$

Im ersten Falle, d. h., wenn die Ankerwickelung verhältnismässig grossen Widerstand besitzt, kann man durch Einschaltung von Hilfswiderständen in diese Windungen beim Angehen die Stromstärke verkleinern, oder man kann durch Verkleinerung von ω, d. h. durch Verringerung der Periodenzahl, J_1 verkleinern. Letzteres ist nur möglich, wenn es angängig erscheint, den Motor mit dem Stromerzeuger zusammen angehen zu lassen. Bei einfachen Arbeitsübertragungen, in welchen ein grösserer Motor allein die elektrische Arbeit des Stromerzeugers aufnimmt und die sämtlichen Maschinen einer Fabrik durch Transmissionen in Thätigkeit setzt, wird dies gelegentlich zulässig erscheinen.

In dem in der Praxis häufiger vorkommenden zweiten Falle wird man geringere Stromstärken beim Anlaufen dadurch erreichen, dass man die Selbstinduktion L_2 des Ankers möglichst gross macht. Da auch L_1 im Nenner steht, wird man $M = b\sqrt{L_1 L_2}$ thunlichst zu vergrössern suchen müssen. Das kann man dadurch erreichen, dass man den magnetischen Widerstand des Kraftlinienweges verringert, d. h. vor allem den Luftzwischenraum d zwischen Feldeisen und Ankereisen recht klein wählt und auch sonst alles thut, um b möglichst gross, d. h. die magnetische Streuung recht klein zu machen.

Um die Anlaufsstromstärke recht niedrig zu halten, hat man endlich, da der vom Motor aufgenommene Effekt den Wert

$$\frac{3}{2}\,E_1\,J_1 \cos\varphi_1$$

besitzt, noch die beiden anderen Wege, nämlich den, E_1 gross zu wählen, oder die Anordnung so zu treffen, dass der Leistungsfaktor $\cos\varphi_1$, nahe gleich 1 wird.

Der Wert von $\cos\varphi_1$ kann ohne weiteres aus dem rechtwinkligen Dreieck D A F in Fig. 187 (S. 262) abgelesen werden.

Es ist:

$$\cos\varphi_1 = \frac{J_1}{E_1} \cdot (W_1 + \tfrac{1}{2}\, m_2 \cdot \omega \cdot M \cdot J_2 . \cos\varphi_2) \quad . \quad . \quad 12)$$

Wenn man für J_2 und $\cos\varphi_2$ die früher gefundenen Werte einsetzt, kann man unter der vereinfachenden Annahme, dass W_2 gegen $\omega \cdot \frac{m_2}{2} \cdot L_2$ klein ist, näherungsweise dafür schreiben:

$$\cos\varphi_1 = \frac{J_1}{E_1}\left(W_1 + \frac{3}{m_2} \cdot b^2 \cdot \frac{N_1^2}{N_2^2} \cdot W_2\right) \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

Hierin bedeutet N_1 die Zahl der Drähte für jede der drei Phasen in der Feldwickelung und N_2 die Anzahl Drähte auf jeder Phase der Ankerwickelung.

Man sieht, dass man W_1 und W_2 und $\frac{N_1}{N_2}$ recht gross und ebenso E_1 thunlichst klein machen müsste, damit der Winkel φ_1 recht klein und dadurch der Leistungsfaktor $\cos\varphi_1$ möglichst gross wird.

Daraus ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, um Drehstrommotoren mit geringen Stromstärken J_1 zum Angehen zu bringen:

1. Man kann in den primären Stromkreis induktionsfreie Widerstände einschalten, um W_1 zu vergrössern.

2. Man schaltet beim Anlassen in die Ankerwindungen Widerstände etwa durch Schleifringe ein, die später beim Betriebe kurz geschlossen werden.

3. Es wird m_2 verkleinert, dadurch, dass man beim Anlassen nur einen Teil der Ankerwindungen kurz schliesst und die anderen erst später, wenn der normale Betrieb erreicht ist.

4. Durch Gebrauch eines Transformators mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis kann beim Angehen $\frac{J_1}{E_1}$ vergrössert werden.

5. Auch das Verhältnis $\frac{N_1}{N_2}$ kann durch geeignete Vorrichtungen während des Anlaufes vergrössert werden, indem man z. B. beim Angehen einige Phasen des Ankers entgegengesetzt einschaltet.

b) Das Verhalten des Drehstrommotors, wenn der Anker rotiert.

Durch das rotierende Magnetfeld, das im ruhenden Eisenkörper des Feldmagneten erzeugt wird, entstehen in der Ankerwickelung elektromotorische Kräfte und Ströme, die um so grössere Stärke besitzen, je schneller sich das Magnetfeld an den Ankerdrähten vorüberbewegt. Zugleich aber entstehen durch die Wechselwirkungen zwischen

dem rotierenden Magnetfelde und den Ankerströmen Zugkräfte, die tangential an den Ankerdrähten angreifen. Der Anker beginnt zu rotieren.

Wäre die Drehgeschwindigkeit des Ankers gleich der des Feldes, so würden die relativen Stellungen der Ankerdrähte zu den Kraftlinien des Feldes ungeändert bleiben, und es würden in den Ankerdrähten überhaupt keine Ströme entstehen; die Zugkraft würde Null sein. — In Wirklichkeit wird daher der Anker um etwas hinter dem Drehfelde zurück bleiben, die Kraftlinien des Feldes schneiden die Ankerdrähte um so öfter, d. h. je grösser die Geschwindigkeitsdifferenz wird. Die Zugkraft des Ankers ist daher um so grösser, je stärkere Ströme im Anker induziert werden, je mehr der Anker hinter dem rotierenden Magnetfelde zurück bleibt. In der Praxis beträgt bei voller Belastung die Geschwindigkeitsdifferenz gegen Leerlauf nur 2 bis 7%.

Der Anker eines Arbeit leistenden Drehstrommotors bleibt demnach immer um einen kleinen Betrag hinter der Rotationsgeschwindigkeit des magnetischen Drehfeldes zurück. Nennen wir die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes ω, die des Ankers ω', so nennt man die Grösse:

$$\frac{\omega - \omega'}{\omega} = \sigma$$

die Schlüpfung des Motors.

Aus dem Vektordiagramm, Fig. 187, das wir schon mehrfach benutzt haben, ergiebt sich für die in der Feldwickelung thätige EMK E_1 die Gleichung:

$$E_1^2 = \left(W_1 J_1 + \frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot M \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2\right)^2 + \\ + \left(\tfrac{3}{2}\, \omega\, L_1 J_1 - \frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot M \cdot J_2 \cdot \sin \varphi_2\right)^2 \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

Die in einer Phase des Ankers induzierte EMK E_2 ist proportional der Differenz der Geschwindigkeiten des Drehfeldes und des Ankers, dem Koëffizienten der wechselseitigen Induktion und der primären Stromstärke.

$$E_2 = \tfrac{3}{2} \cdot (\omega - \omega') \cdot M \cdot J_1$$

oder

$$E_2 = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot \sigma \cdot M \cdot J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

Diese EMK E_2 hält gleichzeitig zwei anderen das Gleichgewicht:

1. der Spannung $W_2 J_2$, die im Widerstande der Ankerwickelung verbraucht wird,

2. der in der Phase um 90° gegen diese verschobenen EMK E_g, die durch das sekundäre Drehfeld induziert wird, das zum Anker die

relative Winkelgeschwindigkeit $\omega - \omega'$ hat,

$$E_g = \frac{m_2}{2} (\omega - \omega') L_2 J_2$$

E_2 und diese beiden soeben definierten EMKräfte bilden daher wieder ein rechtwinkliges Dreieck, dessen Hypotenuse E_2 und dessen Katheten $W_2 J_2$ und E_g sind.

Aus diesem Dreieck folgt sofort:

$$\cos \varphi_2 = \frac{W_2}{\sqrt{W_2^2 + \frac{m_2^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_2^2}},$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{\frac{m_2}{2} \cdot \omega \cdot \sigma \cdot L_2}{2 \cdot \sqrt{W_2^2 + \frac{m_2^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_2^2}} \quad . \; . \; . \; 16)$$

$$J_2 = \frac{\frac{3}{2} \cdot \omega \cdot \sigma \cdot M \cdot J_1}{2 \cdot \sqrt{W_2^2 + \frac{m_2^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_2^2}} \quad . \; . \; . \; . \; 17)$$

Wenn man diese Werte in Formel 14) einsetzt, erhält man einen ziemlich verwickelten Ausdruck für E_1, aus dem man dann ohne weiteres auch J_1 aus lediglich bekannten Grössen bestimmen kann.

Das Drehungsmoment D ist gleich der vom Anker aufgenommenen Arbeit $\frac{m_2}{2} \cdot W_2 \cdot J_2^2$ dividiert durch die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten des magnetischen Drehfeldes und des Ankers $\omega - \omega'$, also:

$$D = \frac{m_2 \cdot W_2 \cdot J_2^2}{2 (\omega - \omega')}.$$

Setzt man hierin den Wert für J_2 aus Gleichung 17) und σ ein, so erhält man:

$$D = \frac{9}{16} \cdot m_2 \cdot \frac{\omega \cdot \sigma \cdot M^2 \cdot W_2}{W_2^2 + \frac{m_2^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_2^2} \cdot J_1^2 \quad . \; . \; 18)$$

Diese Formel ist anwendbar, wenn die primäre Stromstärke unveränderlich bleibt. Benutzt man den Wert von J_1 aus Gl. 11) und berücksichtigt, dass:

$$M^2 = b^2 \cdot L_1 \cdot L_2$$

so ergiebt sich:

$$D = \frac{\frac{3}{2} \cdot b^2 \cdot \omega \cdot \sigma \cdot W_2}{\omega^2 \cdot \left\{ W_2^2 \cdot \frac{3 L_1}{m_2 L_2} + \sigma^2 \cdot W_1^2 \cdot \frac{m_2 L_2}{3 L_1} + 2 b^2 \cdot \sigma \cdot W_1 \cdot W_2 + \frac{3 m_2}{4} \cdot b^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_1 L_2 (1 - b^2)^2 \right\}} \cdot E_1^2 \quad 19)$$

Dieser Ausdruck wird verwendet, wenn mit konstanter primärer Spannung E_1 gearbeitet wird.

Man kann übrigens auch J_1 aus der für E_2 gegebenen Gleichung 16) ermitteln und diesen Wert in den Ausdruck für D ein setzen, dann erhält man:

$$D = \frac{m_2}{2} \cdot \frac{W_2}{\omega \cdot \sigma \cdot \left[W_2^2 + \frac{m_2^2}{4} \omega^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_2^2 \right]} \cdot E_2^2 \, . \quad 20)$$

Da in der Praxis die Schlüpfung σ eine sehr kleine Grösse (etwa 0,02 bis 0,07) ist, und die Selbstinduktion L_2 des Ankers L_2 aus den früher angegebenen Gründen auch möglichst klein gemacht wird, kann das Glied: $\frac{m_2^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot \sigma^2 \cdot L_2^2$ vernachlässigt werden.

Dann findet man für D den Näherungswert:

$$D = \frac{m_2 \cdot E_2^2}{2 \omega \cdot \sigma \cdot W_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 21)$$

Diese Formel gilt für den der Betrachtung zu Grunde gelegten zweipoligen Motor; bei einem Mofor mit p Polpaaren wird das Drehungsmoment p mal so gross. Beachtet man ferner, dass die effektive EMK $\overline{E}_2 = \frac{E}{\sqrt{2}}$ ist, so ergiebt sich allgemein für den Drehstrommotor

$$D = \frac{p \cdot m_2 \cdot \overline{E}_2^2}{\omega \cdot \sigma \cdot W_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 22)$$

Die Leistung A des Motors in Watt ist:

$$L = \frac{\omega' \cdot D}{p} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 23)$$

Nach Einsetzung des Wertes für D und unter Berücksichtigung, dass $\omega' = \omega\,(1 - \sigma)$ ist, erhält man:

$$A = \frac{m_2 \cdot \overline{E}_2^2}{W_2}\, p \cdot \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \quad \ldots\ldots \quad 24)$$

Nunmehr ist bloss noch E_2 aus den Abmessungen und Wickelungsverhältnissen zu bestimmen.

Wir bezeichnen mit: B die Anzahl Kraftlinien des Drehfeldes für 1 *qcm* im Luftzwischenraume von der Breite δ, l die Breite des Anker- und Feldeisens, d den inneren Durchmesser des Feldeisens, p die Zahl der Polpaare. Mit h_1 bezeichnen wir ferner die Dicke des Eisens des Feldmagneten (Ständers) ausserhalb der Wickelung, mit h_2 die Dicke des Ankereisens (Läufers) innerhalb der Wickelung.

Dann ist die Umfangsgeschwindigkeit v des Drehfeldes in *cm* pro Sekunde:

$$v = \frac{\omega \cdot d}{2\,p} = \frac{\pi \cdot \sim \cdot d}{p} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 25)$$

wenn $\sim$ die Periodenzahl des zugeführten Drehstromes ist.

Ferner ist:

$$b_1 \, E_1 \cdot = v \cdot B \cdot N_1 \cdot l \cdot 10^{-8} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 26)$$

und hieraus:

$$B = \frac{b_1 \cdot p \cdot E_1 \, 10^8}{\pi \cdot \sim \cdot d \cdot l \cdot N_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 27)$$

Ausserdem gilt für die im Anker induzierte EMK E_2 nach den Induktionsgesetzen der Ausdruck:

$$E_2 = b_2 \cdot v \cdot B \cdot N_2 \cdot l \cdot \sigma \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 28)$$

Hierin sind b_1 und b_2 Streuungskoëffizienten,

$$b^2 = b_1 \cdot b_2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 29)$$

Setzt man den für B gefundenen Wert in die Gleichung für E_2 ein, so findet man:

$$E_2 = b^2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 \cdot \sigma \cdot 10^8 \quad . \; . \; . \; . \; . \; 30)$$

Das ist für $\sigma = 1$ dieselbe Gleichung, die wir schon früher beim Transformator gefunden haben. (S. 185, Gl. 7.)

c) Die Berechnung des Erregerstromes und des Belastungsstromes.

Ist J_n der Maximalwert $\overline{J}_n$ der effektive Wert des Nutzstromes eines Drehstrommotors, d. h. der Strom, der ohne Phasenverschiebung die Leistung L (in Watt) des Motors liefern würde, η der Wirkungsgrad, so ist:

$$J_n = \frac{L}{3\,\eta \cdot E_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 31)$$

Der effektive Mittelwert des um 90° gegen J_n in der Phase verschobenen Erregerstromes sei $\overline{J_0}$, dann ist der effektive Belastungsstrom $\overline{J}_1$:

$$\overline{J}_1 = \frac{\sqrt{\overline{J}_0^{\,2} + \overline{J}_n^{\,2}}}{b^2} \text{ und } \cos \varphi_1 = \frac{\overline{J}_n \cdot b^2}{\sqrt{\overline{J}_0^{\,2} + \overline{J}_n^{\,2}}} \quad . \; 32)$$

Für $\sigma = o$ wird $\omega = \omega'$, dann läuft der Anker synchron, dann aber ist die Induktion auf die Ankerwindung Null, und der Strom J_1 reduziert sich auf den Erregerstrom J_0.

Man erhält dann:

$$J_0 = \frac{2 E_1}{3 \omega L_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 33)$$

Hierin ist:

$$L_1 = \frac{2 \pi N_1^2 \cdot 10^{-9}}{p \cdot \left(\frac{2 \delta}{F_0} + \frac{\lambda_1}{\mu_1 F_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2 F_2} \right)}$$

und zwar sind $F_1 = 0{,}85\ h_1 \cdot l$ und $F_2 = 0{,}85\ h_2 \cdot l$ die thatsächlichen Eisenquerschnitte des Feldes und des Ankers in *qcm*, und $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{d \pi}{2 p}$ näherungsweise die Länge des Kraftlinienweges im Eisen.

Wenn man den magnetischen Widerstand der Kraftlinien im Feldeisen und Ankereisen gegen den magnetischen Widerstand im Luftzwischenraume vernachlässigt, kann man in sehr naher Annäherung:

$$L_1 = \frac{2 \pi \cdot N_1^2}{10^9 \cdot p \frac{2 \delta}{F_0}}$$

setzen, wobei $F_0 = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{3 p}$ ist (d Durchmesser, l Breite des Ankers, 2 p Polzahl).

Um den Leerlaufstrom J_0 möglichst klein zu machen, muss somit L_1 möglichst gross, d. h. der Luftzwischenraum möglichst klein und F_0 recht gross gemacht werden. Der Grösse F_0 kann durch Vergrösserung der Abmessungen des Ankers und Verkleinerung der Polzahl ein beträchtlicher Wert gegeben werden. Der Wunsch, Drehstrommotoren mit kleiner Leerlaufstromstärke zu bauen, führt daher auf verhältnismässig grosse Abmessungen und hohe Tourenzahlen, Bedingungen, die zu erfüllen man in der Praxis Bedenken tragen wird.

Die vom Motor abgegebenen Watt W sind gleich $D \cdot \omega'$. Die vom Motor überhaupt aufgenommenen Watt bestehen aus zwei Teilen, aus den vom Anker aufgenommenen Watt $D \cdot \omega$ und der im Felde in Wärme umgesetzten Energie $\frac{3}{2} \cdot W_1 \cdot J_1^2$. Der Wirkungsgrad η des Motors ist somit:

$$\eta = \frac{D \cdot \omega'}{3 \cdot W_1 \cdot \overline{J_1}^2 + D \cdot \omega} \quad \ldots\ldots \quad 34)$$

oder in naher Annäherung, wenn man den ersten Teil des Nenners vernachlässigt:

$$\eta = \frac{\omega'}{\omega} = 1 - \sigma \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 35)$$

Der Wirkungsgrad eines Drehstrommotors hängt somit wesentlich von dem Betrage der Schlüpfung ab und wird um so kleiner, je grösser die Schlüpfung σ ist.

4. Bestimmung des Feldes eines Drehstrommotors.[1]

Der eiserne Hohlcylinder, der den Feldmagneten der meisten Drehstrommotoren bildet, kann mit Ringwickelung, Trommelwickelung oder Polwickelung versehen werden. Ist die Primärspannung E_1 hoch, so wird man der Ring- oder Polwickelung den Vorzug geben, weil man dann Kreuzungen von Drähten, die sehr verschiedene Spannung haben, leicht vermeiden kann.

Die Trommelwickelung lässt sich leicht als Stabwickelung ausführen und bietet den Vorteil, dass dann die magnetische Streuung geringer ist. Die Querverbindungen der Stäbe ausserhalb des Eisens können, ähnlich wie dies auch bei den Stromerzeugern geschieht, (vergl. Fig. 126, S. 156) in verschiedenen Ebenen untergebracht werden, so dass auch die Isolation keine Schwierigkeiten bereitet.

Von Wichtigkeit ist die Wahl der Polzahl 2 p, und diese wiederum hängt wesentlich von der Zahl der Perioden $\sim$, der Grösse des Motors und der zulässigen Schlüpfung σ ab.

Die Umlaufszahl V des Ankers in der Minute ist:

$$V = \frac{60 \sim}{p} (1 - \sigma) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 36)$$

Will man daher mässige Umlaufszahlen erhalten, so muss die Polzahl 2 p in demselben Masse vergrössert werden, wie die Periodenzahl $\sim$.

Da nun Motoren mit grösserer Polzahl kostspieliger sind, und der Leerlaufstrom oder Magnetisierungsstrom um so grösser wird, und die so schädliche Streuung zunimmt, je mehr Pole man wählt, so ergiebt sich daraus, dass es für den Gebrauch von Motoren zweckmässig ist, mit niedriger Wechselzahl $\sim$ zu arbeiten. Ohne Rücksicht auf die Schlüpfung giebt die nachfolgende Tabelle hierüber Auskunft:

Polzahl des Motors	Umlaufszahl V des Ankers in 1 Minute	
	bei $\sim$ = 50 in 1 Sek.	bei $\sim$ = 130 in 1 Sek.
4	1500	3900
6	1000	2600
8	750	1950
10	600	1560
12	500	1300

[1]) Nach E. Kolben, ETZ 1893, S. 572.

Daher kommt es, dass man in Europa jetzt fast allgemein mit der Periodenzahl $\sim = 50$ arbeitet, also die niedrigste Wechselzahl benutzt, bei der die Bogenlampen noch nicht flimmern.

Bei der grossen Bedeutung, die die Verminderung der Streuung für Wechselstrommotoren besitzt, werden neuerdings die Wickelungen des Feldes meist nicht mehr in Löcher des Feldeisens gelegt (Fig. 66, S. 105), sondern man benutzt Nuten mit übergreifenden Zähnen. (Fig. 67.)

Für die Induktion im Feldeisen haben sich Werte von B zwischen 6000 und 5000 Kraftlinien am zweckmässigsten erwiesen, im Luftraum δ beträgt dann die Kraftliniendichte B_1 zwischen 3000 und 2000.

Den Ankerdurchmesser d, der auch den inneren Durchmesser des Feldeisens $d + 2\,\delta$ bestimmt, ermittelt man nach der Formel:

$$d = \frac{60 \cdot \text{Umfangsgeschwindigkeit}}{\pi \cdot V} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 37)$$

Für die Umfangsgeschwindigkeit wählt man Zahlen zwischen 1500 bis 2500 *cm*.

δ wird so klein als möglich gewählt; der höchste Wert dürfte bei grösseren Motoren 2 *mm*, bei kleineren 1 *mm* betragen.

Die Anzahl der Feldwindungen N_1 pro Phase (bei Trommelwickelung die Drahtzahl) bestimmt man aus der empirischen Formel:

$$N_1 = 180 \cdot \frac{D_1}{J_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 38)$$

Die primäre Wickelung wird möglichst gleichförmig am Umfange des Feldes verteilt.

Die Totalinduktion $\Phi = B \cdot q$, wo q der effektive Eisenquerschnitt ist, ergiebt sich aus der Formel:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot E_1 \cdot 10^8}{2\,\pi \sim \cdot N_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 39)$$

Die nützliche Induktion Φ' ist wegen der Streuung b nur 85% bis 90% von Φ. Es ist $q = 0{,}85 \cdot h \cdot l$, wenn man 15% für die isolierenden Papierblätter zwischen den Eisenblechen abrechnet.

Bei p Polpaaren wird die effektive Eisenfläche eines Poles $\frac{0{,}85\,\pi\,D_1 \cdot l}{2\,p}$ gross.

Demnach ist die nützliche Totalinduktion durch einen Pol

$$2\,\Phi' = \frac{0{,}85 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l \cdot B_1}{2\,p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 40)$$

wenn B_1 die maximale Induktion im Luftraume ist.

Hieraus findet man die Breite des Feldes

$$l = \frac{4\,p\,\Phi'}{0{,}85\,\pi\,D_1\,B_1}$$

oder

$$l = \frac{0{,}32 \cdot p \cdot \bar{E}_1 \cdot 10^8}{D_1 \cdot B_1 \cdot \sim \cdot N_1} \quad \ldots\ldots \quad 41)$$

und

$$h = 0{,}9\,\frac{B_1 \cdot D_1}{p \cdot B} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 42)$$

h ist die Dicke des Feldeisens, vermindert um die Tiefe der Nuten.

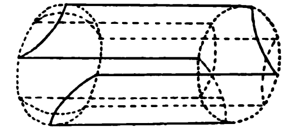


Fig. 190. Phasenanker mit zwei Abteilungen.

5. Bestimmung des Ankers eines Drehstrommotors.

Im Anker können entweder alle Stäbe durch zwei aussen gelegene Kurzschlussringe parallel geschaltet werden (v. Dobrowolski's Kurzschlussanker, auch Eichhörnchenkäfig genannt), oder aber es werden mehrere Abteilungen gewickelt, deren Stäbe hinter einander



Fig. 191. Phasenanker der Maschinenfabrik Oerlikon mit drei Abteilungen.

geschaltet werden, so dass jede Abteilung ebenfalls 2 p Pole bildet, wie das äussere Feld, und dass jede Abteilung entweder für sich kurz geschlossen wird oder dass sie an Schleifringen endet, wodurch beim Anlassen äussere Widerstände vorgeschaltet werden können. Solche Anker nennt man Phasenanker.

So zeigt z. B. Fig. 190 die Schaltung eines Phasenankers in zwei Abteilungen; Fig. 191 stellt einen fertigen Phasenanker der Maschinenfabrik Oerlikon mit drei Abteilungen dar.

Bei Kurzschlussankern brauchen die Stäbe gar nicht vom Ankereisen isoliert zu werden, auch kann das Ankereisen massiv sein.

Die Umfangsgeschwindigkeit U' des Ankers ist mit Rücksicht auf die Schlüpfung:

$$U = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot V \cdot (1 - \sigma)}{60} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 43)$$

Besteht jede der m_2 Abteilungen des Ankers aus r hinter einander geschalteten Stäben und ist l die der Induktion unterworfene Länge eines solchen Stabes, so ist die Maximalinduktion E_2 in jeder Ankerphase

$$E_2 = r \cdot l \cdot B_1 \cdot U \cdot \sigma \cdot 10^{-8} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 44)$$

Der Wattverlust durch Stromwärme in den sämtlichen m_2 Phasen der Ankerwickelung ist: $m_2 \cdot \frac{\overline{E}_2{}^2}{W_2}$.

Die Leistung des Motors in Watt war früher gefunden worden und betrug:

$$A = m_2 \cdot \overline{E}_2{}^2 \cdot \left(\frac{1}{\sigma} - 1\right).$$

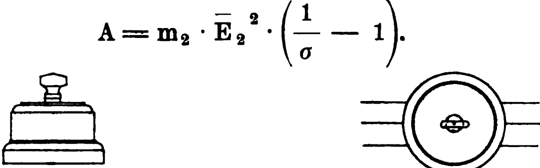


Fig. 192a. Fig. 192b.
Ausschalter für kleine Drehstrommotoren.

Setzt man hierin den vorher angegebenen Wert für $\overline{E}_2$ ein, so findet man:

$$A = \frac{N_2{}^2 \cdot l^2 \cdot B_1{}^2 \cdot U^2}{10^{16}\, m_2 \cdot W_2} \cdot \sigma \cdot (1 - \sigma) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 45)$$

und hieraus den Widerstand einer Ankerphase

$$W_2 = \frac{N_2{}^2 \cdot l^2 \cdot B_1{}^2 \cdot U^2}{10^{16} \cdot m_2 \cdot A} \cdot \sigma \cdot (1 - \sigma) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 46)$$

Unter Verwendung der Umfangsgeschwindigkeit U_1 kann man auch der Stromstärke $\overline{J}_2$, die in den Ankerwickelungen fliesst, noch eine etwas andere Gestalt geben. Es ist:

$$\overline{J}_2 = \frac{\overline{E}_2}{W_2} = \frac{r \cdot l \cdot B_1 \cdot U \cdot \sigma}{10^8 \cdot W_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 47)$$

wenn $W_2 = r \cdot W_0$ und W_0 den Widerstand eines Ankerstabes und r die Anzahl der Stäbe einer Ankerphase bedeutet.

6. Beschreibung einiger Drehstrommotoren.

Kleine Drehstrommotoren werden meist mit Kurzschlussankern gebaut. Der rotierende Anker steht daher in keinerlei Verbindung

mit dem Betriebsstrome. Beim Anlassen grösserer Motoren wird in dem Feldstromkreis zunächst ein induktionsfreier Widerstand eingeschaltet und dieser stufenweise herausgenommen, je mehr sich die Umlaufszahl des Ankers der normalen Tourenzahl nähert; oder man bedient sich beim Anlassen eines Transformators mit veränderlichem Umsetzungsverhältnis. Kleine Motoren, bis etwa 7 Pferdestärken, die an grössere Verteilungsnetze angeschlossen sind, werden auch ohne weiteres durch einen Ausschalter mit drei Verbindungsstücken (vergl. Fig. 191 a und b) ein- und ausgeschaltet.



Fig. 193. Grösserer Drehstrommotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

A. Drehstrommotoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die Fig. 193 stellt einen 50 pferdigen Drehstrommotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin dar. Der Feldmagnet besteht aus 102 Kupferstäben, von denen je 34 zu einer Phase des Drehstromes gehören. Jede Phase bildet eine 8polige Trommelwickelung.

Denkt man sich die Stäbe von 1 bis 102 nummeriert und nimmt an, dass der Strom A in 102 eintritt, so geht man jedesmal um

13 Stäbe entgegen der Uhrzeigerrichtung zurück und umkreist auf diese Weise den Cylinderumfang 4⅓mal. Man gelangt dann, nachdem man 34 Stäbe verbunden hat, zum Stab 83, der mit dem Kerne des Feldmagneten leitend verbunden wird. Den zweiten Strom führt man in den Stab 34, den dritten in den Stab 68 ein und verfährt im übrigen, wie vorher.

Der bei dieser Maschine verwendete Anker besteht aus zwei über einander liegenden Reihen von Kupferstäben, die durch einen Kupferring verbunden sind. Durch drei am oberen Teile des Eisengestelles angebrachte, von diesem isolierte Klemmen werden die drei zum Betriebe erforderlichen Wechselströme zugeführt.

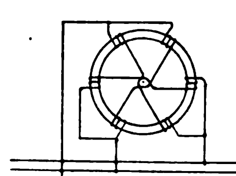


Fig. 194. Schaltung bei kleineren Drehstrommotoren.

Die Umlaufszahl zwischen Leerlauf und Volllast unterscheidet sich bei diesem Motor nur um 4 bis 5%.

Für kleinere Arbeitsleistungen stellt die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft meist die Feldwickelung nach Art des Grammeringes



Fig. 195. Kleiner Drehstrommotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

her und schaltet die einzelnen Abteilungen bei verkettetem Drehstrome in der Weise, wie dies in Fig. 194 schematisch dargestellt ist. Die Fig. 195 zeigt das Äussere eines solchen Drehstrommotors nach Entfernung der einen durchlöcherten Seitenplatte.

Soll bei derartigen Motoren die Drehrichtung geändert werden,

so werden zwei Stromzuführungen mit einander vertauscht. Für kleinere Maschinen kann man sich eines einfachen Umschalters bedienen, wie er durch die Zeichnung in Fig. 192 schematisch erläutert wird. Dreht man den Schalter um 90°, so werden die Leitungen 1 und 2 vertauscht, und der Anker dreht sich in entgegengesetzter Richtung.

Über die Wickelungsverhältnisse eines 6 pferdigen Drehstrommotors, der genau der Fig. 195 entspricht, dessen Anker 950 Umdrehungen in der Minute macht, wenn er mit Drehstrom von 50 Perioden in einer Sekunde betrieben wird, und bei dem der Spannungsunterschied zwischen je zwei Leitungen 190 Volt beträgt, hat uns die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft gütiger Weise folgende Angaben zur Verfügung gestellt.

Im Ständer oder in dem Gehäuse ist Ringwickelung verwendet, die Schaltung ist offen (Sternschaltung). Die Gesamtzahl der Löcher (respektive Spulen) beträgt 72. In jedem Loche liegen sieben Drähte, deren Dicke gleich 3,5 (isoliert 3,9) *mm* ist. Der Widerstand einer Phase ist gleich 0,242 Ohm; das Kupfergewicht der Ständerwickelung ist 28,5 *kg*.

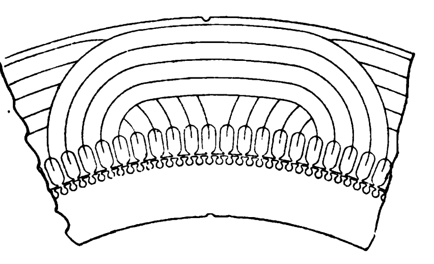


Fig. 196. Wickelung des Ständers eines Drehstrommotors der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Der Läufer oder Anker besitzt 100 Stäbe, die 5,0 *mm* dick (5,5 besp.) sind. Das Gewicht der Stäbe beträgt nur 3,5 *kg*. Diese Stäbe sind durch einen Kurzschlussring verbunden, dessen Querschnitt 40 × 4,5 *qmm* beträgt.

Bei einem 75 pferdigen sogenannten Hochspannungsmotor, der für eine verkettete Spannung von 4750 Volt und 50 Perioden in einer Sekunde bestimmt ist, hat die Bohrung des Ständers einen Durchmesser von 850 *mm*; die Breite des Feldeisens beträgt 250 *mm*.

Das Feldeisen des Ständers trägt 150 Löcher, deren jedes 30 Drähte von 1,6 *mm* Dicke (2,0 besp.) enthält. Jede Phase hat fünf Spulen von 150 Windungen. Die Wickelung erzeugt somit 10 Pole.

Der Läufer oder Anker trägt 252 Stäbe von 6 *mm* Durchmesser, die durch Endverbindungen aus Messing zu 126 einzelnen Schleifen verbunden sind.

Die Verbindung der in den Nuten gelegenen Spulen erläutert die obenstehende Fig. 196.

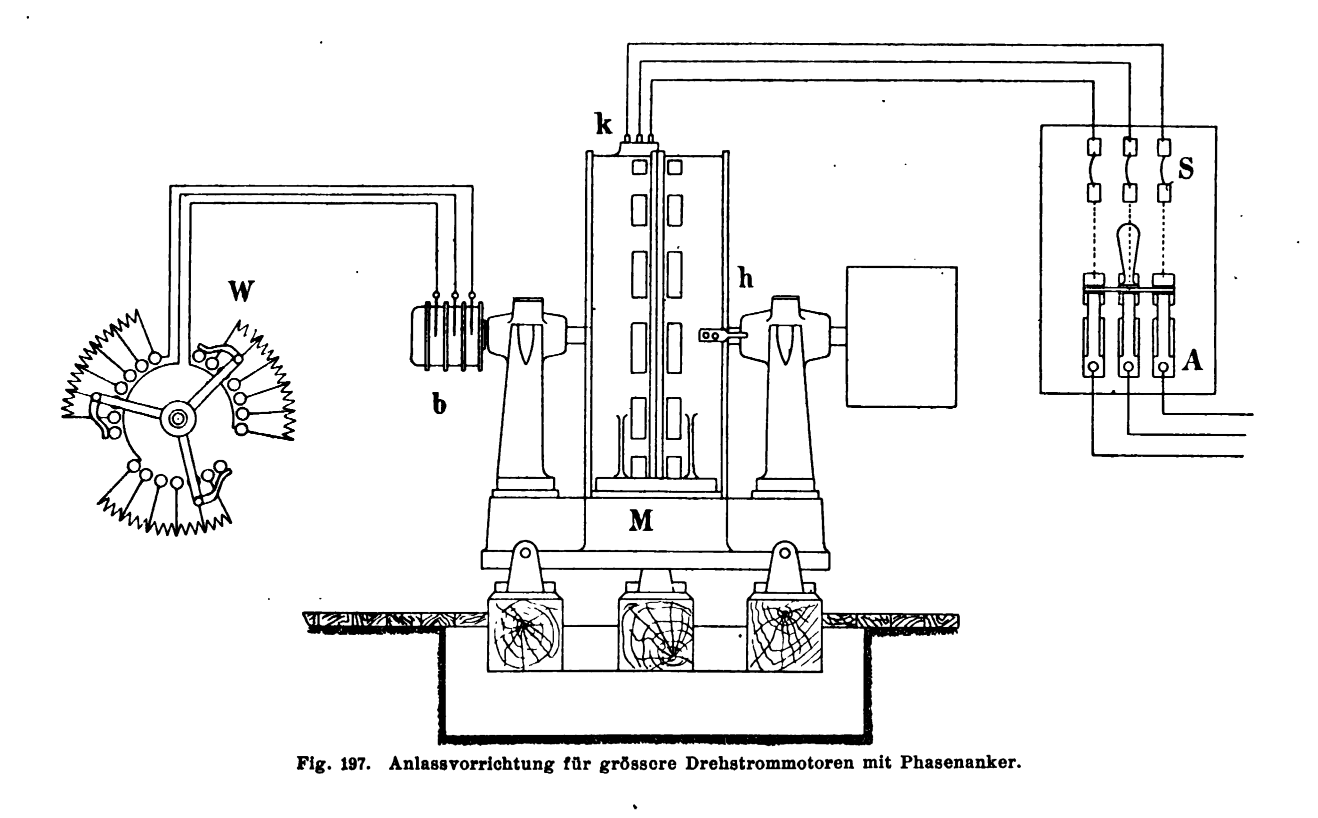


Fig. 197. Anlassvorrichtung für grössere Drehstrommotoren mit Phasenanker.

B. Drehstrommotoren der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Maschinenfabrik Oerlikon verwendet für grössere Drehstrommotoren, von 12 Pferdestärken aufwärts, meist Phasenanker, wie wir einen solchen auf S. 275, Fig. 191, abgebildet haben, und schaltet beim Anlassen in den Ankerstromkreis Widerstände ein. Zu dem Zwecke endet die Ankerwickelung an drei Schleifringen, die sich auf der verlängerten Ankerwelle befinden. In dem Masse, als die Tourenzahl wächst, werden diese Hilfswiderstände (W in Fig. 197)



Fig. 198. Drehstrommotor mit Schleifringen der Maschinenfabrik Oerlikon.

allmählich kurz geschlossen. Die Anlaufsstromstärke nimmt dadurch allmählich bis zur normalen Arbeitsstromstärke des Motors zu. Ist die normale Umlaufszahl erreicht, so werden durch Umlegen eines Hebels bei h die drei Schleifkontakte mittels einer kuppelungsartigen Vorrichtung kurz geschlossen. Durch eine Hebelvorrichtung werden gleichzeitig die Bürsten von den Schleifringen abgehoben, so dass dann der Motor ohne Bürsten mit in sich geschlossenem Anker läuft. Da alle diese Operationen nur mit dem Ankerstromkreise stattfinden, und in diesem nur Strom von geringer Spannung fliesst, so ist keinerlei Gefahr oder lebhaftere Funkenbildung damit verbunden.

Die Abbildung 198 stellt einen solchen für Betrieb durch hochgespannten Strom bestimmten Motor dar. Das Bild zeigt sowohl die Schleifringe b, als den zum Kurzschliessen der Ankerwickelung bestimmten Hebel h und die Feld- und Ankerwickelung.

Die nächste Abbildung (Fig. 199) stellt einen 55 pferdigen Drehstrommotor der obengenannten Firma dar, der für Betrieb durch



Fig. 199. Hochspannungs-Drehstrommotor der Maschinenfabrik Oerlikon.

Drehstrom von 5000 Volt verkettete, also 2900 Volt Phasenspannung bei 50 Perioden in einer Sekunde bestimmt ist.

Das Erregerfeld oder der Ständer hat eine Bohrung von 600 *mm* Durchmesser. Es sind 48 Nuten, für jede Phase demnach 16 vorhanden. Die Wickelung ist eine 8 polige. In jeder Nute liegen 75 Drähte von 1,8 *mm* Dicke (2,35 *mm* besp.).

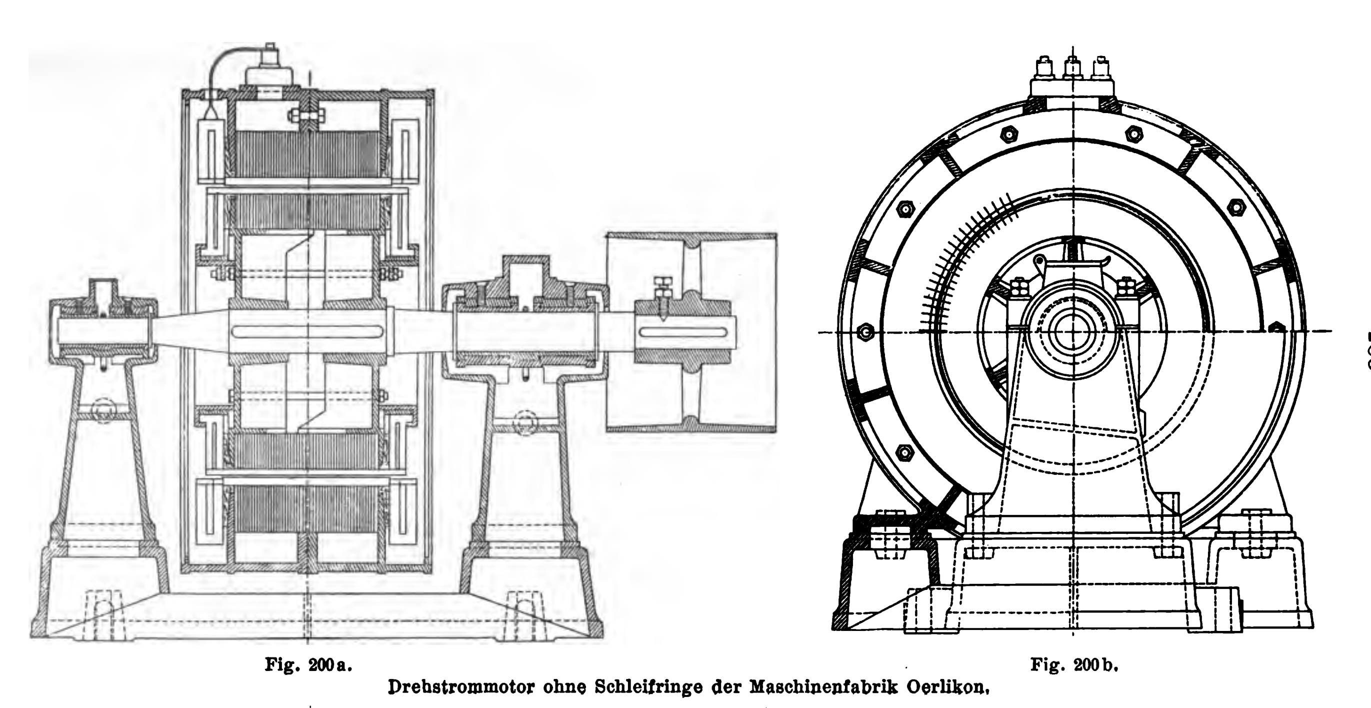


Fig. 200a. Fig. 200b.

Drehstrommotor ohne Schleifringe der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Feldwickelung ist so angeordnet, dass z. B. der aus Nute 1 austretende Draht nach Nute 8 und der aus Nute 2 austretende Draht nach Nute 7 geführt und diese beiden zu einer Phase gehörenden Spulen hinter einander geschaltet sind. In den Nuten 3 und 4 liegen dann die zur zweiten Phase, in den Nuten 5 und 6 die zur dritten Phase gehörenden Spulen u. s. f.

Der Anker oder Läufer hat einen inneren Durchmesser von 598 *mm*. Er trägt 168 Stäbe von 6 *mm* Dicke (6,6 *mm* besp.), die in drei Phasen gewickelt sind.

Der Anker macht bei Vollbelastung unter den angegebenen Umständen 720 Umläufe in einer Minute.

Die Einzelheiten der Konstruktion eines Drehstrommotors von 36 PS ohne Schleifringe der Maschinenfabrik Oerlikon zeigen die beiden Durchschnitte Fig. 200a und 200b.

Dieser Motor ist für 190 Volt verkettete Spannung und 50 Perioden bestimmt.

Das Erregerfeld enthält 94 Nuten und in jeder Nute liegen zwei Stäbe mit 3 × 14 *qmm* Querschnitt. Zur Verbindung der einzelnen Stäbe dienen Gabeln, die einen Querschnitt von 2 × 18 *qmm* besitzen. Die Bohrung beträgt 510 *mm*.

Im Anker befinden sich 150 Stäbe, die in fünf Phasen vereinigt sind. Jeder solcher Stab hat einen Querschnitt von 4 × 10 *qmm*; die Verbindungsstücke zeigen Querschnitte von 2,5 × 14 *mm*.

C. Drehstrommotoren von Siemens & Halske.

Auch Siemens & Halske vermeiden zu grosse Stromstärken beim Anlassen des Motors dadurch, dass sie Widerstände in den Ankerstromkreis eines Phasenankers durch drei Schleifringe und Bürsten einschalten. Dann läuft der Motor mit voller Kraft an. Bei Einschaltung von Widerstand in den Stromkreis der Feldmagneten nimmt die Zugkraft erheblich ab, so dass man die Motoren dann mit einer Leerscheibe versehen muss und sie nur unbelastet anlaufen lassen kann.

Durch Einschalten von Widerständen in den Ankerstromkreis kann man auch die Schlüpfung verändern, also in gewissen Grenzen die Umlaufszahl des Ankers nach Bedarf regeln. Sowohl die Maschinenfabrik Oerlikon als Siemens & Halske haben gelegentlich diesen Kunstgriff angewendet. Da aber durch eine derartige Einschaltung von Widerständen der Wirkungsgrad sehr herabgedrückt wird, empfiehlt es sich, nur in Notfällen und nur vorübergehend von diesem Hilfsmittel Gebrauch zu machen.

Neuerdings bedienen sich zur Herabsetzung der Tourenzahl auf

nahezu die Hälfte Siemens & Halske auch des Kunstgriffes, dass sie eine der drei Phasen des Drehstromes ausschalten.[1])

Da bei Aufzügen, Krahnen u. s. w. häufig ein Umsteuern, d. h.

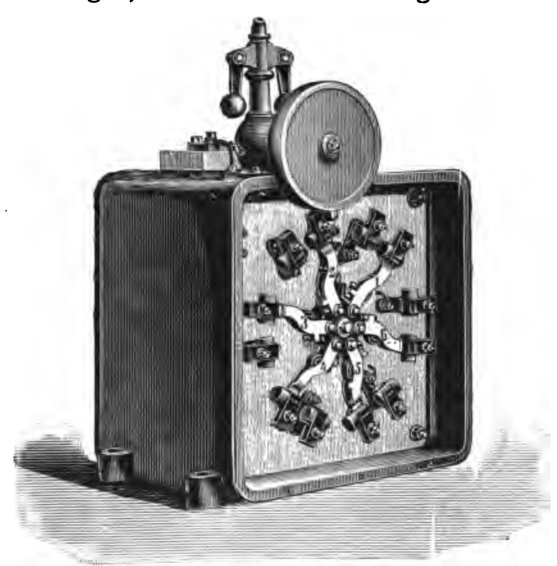


Fig. 201. Anlassvorrichtung für Drehstrommotoren von Siemens & Halske.

eine entgegengesetzte Drehrichtung des Ankers erforderlich ist, und bei der Vertauschung zweier Leitungen eine starke Funkenbildung nicht zu umgehen ist, so werden von allen Firmen, die sich mit der Ausbildung des Drehstromsystems befasst haben, auch Umsteuerungen konstruiert. Man verwendet für diesen Zweck bei allen grösseren Motoren Kohlenkontakte, die den Vorteil darbieten, dass sie durch die entstehenden Lichtbogen nicht leiden und nicht zusammen schweissen.

Die Fig. 201 stellt einen Anlasser mit Kohlenkontakten und Fig. 202 einen Umsteuerapparat vor, wie solche von Siemens & Halske verwendet werden. Der Anlasser besitzt eine kleine Riemenscheibe, die durch einen leichten Riemen mit dem

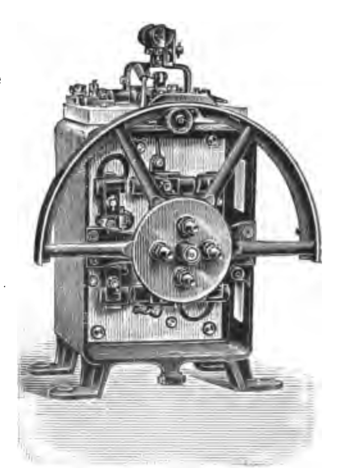


Fig. 202. Umsteuerapparat für Drehstrommotoren von Siemens & Halske.

[1]) Vergleiche H. Görges, ETZ 1896, S. 517.

Motor verbunden wird. Diese Riemenscheibe setzt einen Centrifugalregulator in Thätigkeit, der mit zunehmender Drehgeschwindigkeit mehr und mehr Widerstand aus dem Ankerstromkreis ausschaltet und schliesslich, nachdem die normale Tourenzahl erreicht ist, die Ankerwickelung selbstthätig kurz schliesst.

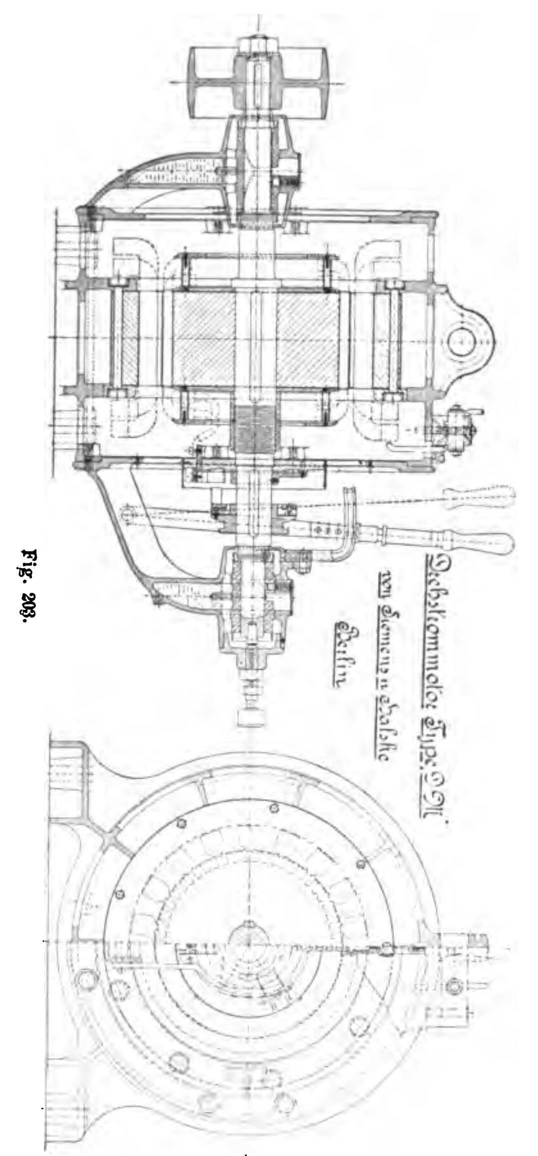


Fig. 203.

Um Anlassvorrichtungen in Fällen, in denen eine starke Anzugskraft nicht erforderlich ist, ganz entbehrlich zu machen, haben **Siemens & Halske** noch einen anderen Weg beschritten; sie schalten während der Periode des Anlaufens einzelne Teile der Ankerwickelung gegen einander, so dass nur wenige Ströme entstehen können. Ist eine gewisse Geschwindigkeit erreicht, so werden auch die vorher entgegengesetzt geschalteten Windungen hinter die anderen geschaltet, und nunmehr nimmt der Anker alsbald seine vorgeschriebene Umlaufszahl an und übt sein volles Drehungsmoment aus.

In Fig. 203 ist ein Drehstrommotor mit Gegenschaltung abgebildet. Die Umschaltung erfolgt in der einfachsten Weise dadurch, dass der in der Figur sichtbare Hebel umgelegt wird. Man verschiebt dadurch eine Hülse, die auf der Welle sitzt und von dieser

durch Feder und Nut gezwungen wird, an der Rotation teil zu nehmen. Durch die Verschiebung werden drei Kontakte unter sich kurz geschlossen, die mit der Ankerwickelung in fester Verbindung stehen. So lange der Motor läuft, bleiben die drei Kontakte fest geschlossen, so dass Reibungsarbeit und Verschleiss nicht vorhanden sind. Die drei Kontakte bilden nichts weiter als einen dreipoligen Ausschalter, der so lange geschlossen bleibt, wie der Motor läuft. Durch diese Anordnung, die den Anlasser überflüssig macht, wird



Fig. 204. Drehstrommotor der Firma Brown, Boveri & Cie.

nahezu die Einfachheit des Kurzschlussmotors erreicht, ohne dass man dabei dessen Nachteile mit in Kauf nehmen müsste.

D. Drehstrommotoren von Brown, Boveri & Cie.

Die Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden (Schweiz), die sich ebenfalls mit grossem Erfolge an der Ausbildung des Wechsel- und Mehrphasenstromsystems beteiligt hat, bedient sich zum Anlassen eines Anlasstransformators mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis, der wieder ausgeschaltet wird, wenn der Anker annähernd die normale Umlaufszahl erreicht hat.

Die Fig. 204 stellt einen grossen Drehstrommotor dieser Firma für 300 PS und hohe Spannung (3000 V) mit Phasenanker dar. Um eine niedrige Umdrehungszahl zu erreichen, ist die Polzahl sehr gross.

Die Konstruktion des Feldringes stimmt völlig überein mit der des ruhenden Ankers der Mehrphasenstromerzeuger. Die Anordnung

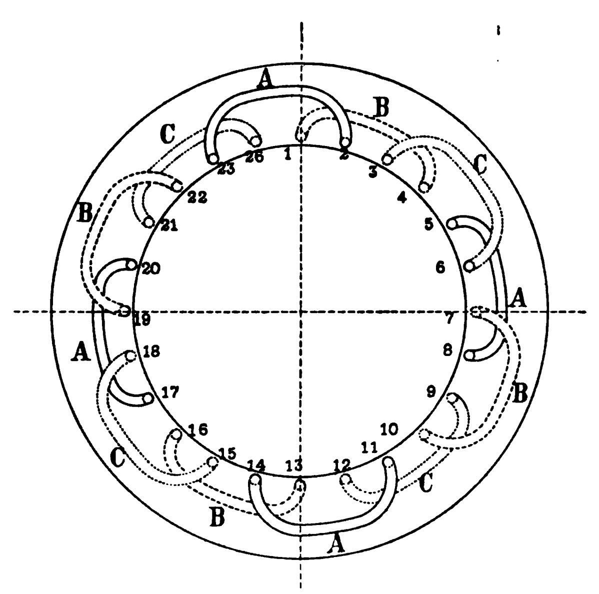


Fig. 205. Feldwickelung für einen vierpoligen Drehstrommotor.

der ausserhalb des Feldeisens gelegenen Teile der Erregerspulen ist für eine vierpolige Wickelung beispielsweise in der nebenstehenden Abbildung (Fig. 205) deutlich zu sehen. Die Spulen sind, um Berührungen zu vermeiden, abwechselnd aufgebogen und näher anliegend, oder gerade und weiter abstehend gewickelt. Nach Fertigstellung der Wickelung werden die Drähte in den Hohlräumen des Eisenkörpers durch kleine Holzkeile befestigt.

10. Kapitel.

Messungen an Wechselströmen und Wechselstrom-Apparaten.

1. Spannungsmessungen von Wechselströmen mit dem Quadrantelektrometer.

Für Präzisionsmessungen von Wechselstromspannungen eignen sich nur das Quadrantelektrometer und das Elektrodynamometer.

Das Prinzip, das bei der Einrichtung des

Quadrantelektrometers

zur Anwendung kommt, sowie das Verfahren bei der Messung mit diesem Instrumente ist schon in den Grundzügen der Elektrotechnik, Kap. X, 1., S. 145, auseinander gesetzt worden. Da aber gerade für die Bestimmung von Potentialdifferenzen bei Wechselströmen dieses Instrument zur Aichung anderer Messvorrichtungen besonders geeignet erscheint, wollen wir kurz auf die verschiedenen Schaltungen nochmals eingehen.

Die Einrichtung des Instrumentes setzen wir dabei als bekannt voraus.

Die gegenüberliegenden Quadranten werden mit einander leitend verbunden und besitzen daher gleiches Potential. Den beweglichen Körper verbindet man durch seinen Aufhängedraht mit einer Elektrizitätsquelle, die ihm eine Ladung erteilt.

Nennt man e_1 und e_2 die Potentiale der beiden Quadrantenpaare und e das Potential des zwischen den Quadranten beweglichen Körpers, so ist der Winkel α, um den sich dieser bewegliche Körper dreht, bis die Torsion der Aufhängevorrichtung der elektrostatischen Anziehung und Abstossung zwischen den Quadrantenpaaren und dem beweglichen Körper das Gleichgewicht hält:

$$\alpha = K \cdot (e_1 - e_2) \cdot \left\{e - \frac{e_1 + e_2}{2}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wobei K eine von der Einrichtung und den Maassverhältnissen des Instrumentes abhängige Konstante ist.

Es ergeben sich drei verschiedene Arten des Gebrauches des Instrumentes:

a) Sind die beiden Quadrantenpaare gleich, aber entgegengesetzt geladen, ist also $e_1 = - e_2$, so wird:

$$\alpha = K \cdot 2 e_1 \cdot e$$

und wenn e_1 konstant ist, und man eine neue Konstante $2 K e_1$ mit K' bezeichnet,

$$\alpha = K' \cdot e \quad \dots \dots \dots \quad 2)$$

Der Ausschlagswinkel ist also dem Potentiale des beweglichen Stückes proportional.

Die konstante Ladung der beiden Quadrantenpaare erreicht man etwa dadurch, dass man sie mit den Enden einer aus vielen Zellen bestehenden Ladungssäule verbindet, deren Mitte mit der Erde leitend verbunden ist.

Den beweglichen Körper verbindet man mit dem Punkte, dessen Potential zu messen ist. (Daher heisst diese Art der Schaltung auch Nadelschaltung.)

Den Wert K' ermittelt man dadurch, dass man den beweglichen Körper mit einer bekannten Spannung in Verbindung setzt, z. B. mit dem einen Ende einer Batterie von Normalelementen, deren anderes Ende an Erde gelegt ist.

Es ist ohne weiteres klar, dass diese Methode für die Messung von Wechselspannungen n i c h t verwendbar ist, da der bewegliche Körper bald angezogen, bald abgestossen werden würde und, da er infolge seiner Trägheit diesen Kräften nicht folgen kann, stehen bleiben müsste.

b) Auch die zweite Art des Gebrauches des Elektrometers, die zumal bei dem Thomson'schen Apparate dieser Art die gewöhnliche ist, eignet sich nicht für die Messung von Spannungen, die rasch ihre Vorzeichen ändern, wie solche bei Wechselströmen vorkommen.

Diese Schaltung kommt dann zur Anwendung, wenn e im Vergleich zu $e_1 + e_2$ verhältnismässig sehr gross ist; dann kann in Gleichung 1) der Wert $\frac{e_1 + e_2}{2}$ in der zweiten Klammer gegen e vernachlässigt werden, und man erhält:

$$\alpha = K \cdot e\,(e_1 - e_2)$$

oder wenn man $K \cdot e = K''$ setzt,

$$\alpha = K'' \cdot (e_1 - e_2) \quad \dots \dots \dots \quad 3)$$

Man elektrisiert in diesem Falle das bewegliche Stück des Elektrometers verhältnismässig hoch, indem man es mit dem inneren Belege einer Leydener Flasche verbindet, deren äusseres Beleg zur Erde abgeleitet ist.

Die Punkte, deren Potentialunterschiede gemessen werden sollen, werden jeder mit einem Paare gegenüberstehender Quadranten verbunden. Der Ablenkungswinkel des beweglichen Stückes, den man beobachtet, ist dann der zu messenden Potentialdifferenz $e_1 - e_2$ proportional.

Die Grösse K″ bestimmt man dadurch, dass man die Ablenkung für eine bekannte Potentialdifferenz beobachtet, indem man z. B. die beiden Quadrantenpaare mit den Polklemmen eines Normalelementes verbindet.

c) Die dritte Schaltungsart (Doppelschaltung genannt) ist dagegen besonders für die Messung von Wechselspannungen geeignet.

Man verbindet in diesem Falle sowohl das bewegliche Stück als ein gegenüberstehendes Quadrantenpaar mit dem einen Punkte P′, das andere gegenüberstehende Quadrantenpaar mit dem anderen Punkte P″ der beiden Punkte P′ P″, deren Potentialdifferenz ermittelt werden soll.

Dann ist $e = e_1$ und somit

$$\alpha = K\,(e_1 - e_2)\left\{e_1 - \frac{e_1 + e_2}{2}\right\}$$

$$= \frac{K \cdot (e_1 - e_2)^2}{2}.$$

Setzt man $e_1 - e_2 = E$ und $\frac{K}{2} = K'''$,

so ist

$$\alpha = K''' \cdot E^2 \quad \ldots\ldots \quad 4)$$

Der Ausschlag ist in diesem Falle also proportional dem Quadrate des zu messenden Spannungsunterschiedes. Auch ändert der Ausschlag bei der Messung von Wechselspannungen seinen Sinn mit dem Richtungswechsel des Stromes nicht, da die Vorzeichen der Ladungen der Quadrantenpaare sich gleichzeitig mit dem Vorzeichen der Ladung des beweglichen Stückes ändern.

P′ P″

Fig. 206. Schaltung des Quadrantelektrometers für Messung von Wechselspannungen.

Die nebenstehende Fig. 206 erläutert die Verbindung der Quadrantenpaare und des beweglichen Stückes.[1])

Man legt nach erfolgter Messung an die Punkte P′ und P″ die Pole eines Normalelementes, dessen EMK von der Grösse E_1 bekannt ist, und beobachtet den Ausschlag α_1, dann ist:

$$\alpha_1 = K''' \cdot E_1^2.$$

und folglich:

$$E = E_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_1}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

[1]) Das bewegliche Stück ist hier, wie bei dem Thomson'schen Quadrantelektrometer, als Lemniskate gezeichnet.

Da E der quadratische Mittelwert der wechselnden Momentanwerte der Spannung ist, misst man somit bei der hier beschriebenen Methode die effektive Spannung.

Die Notwendigkeit, bei der Messung für sorgfältige Isolation aller Teile, zumal der Zu- und Ableitungen besorgt zu sein, macht die Anwendung besonderer Vorrichtungen, sogenannter Elektrometerschlüssel, erforderlich, durch die man rasch hintereinander die Zuleitungen des Instrumentes das eine Mal an die Punkte P' P'' legen kann, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll, und dann an die Pole eines Normalelementes, ohne dass man dabei genötigt wird, eine der Leitungen selbst zu berühren.

Auch für die technische Praxis hat man unter Benutzung derselben Grundsätze besonders für die Messung hoher Wechselspannungen derartige elektrostatische Voltmeter konstruiert. Wir haben schon früher[1]) derartige Einrichtungen beschrieben; dieselben haben aber neuerdings wesentliche Verbesserungen erfahren.

2. Das astatische Elektrodynamometer von Siemens & Halske.

Ähnlich wie man bei Gleichstrom für genaue Spannungsmessungen das Torsionsgalvanometer verwendet,[2]) benutzt man bei Wechselströmen das Elektrodynamometer, dessen Einrichtung auch mit der des Torsionsgalvanometers gewisse Ähnlichkeit hat.[3]) Auch bei diesem Instrumente wird der elektrodynamischen Anziehung zweier von demselben Strome durchflossenen Spulen durch die elastische Gegenkraft einer Torsionsfeder das Gleichgewicht gehalten und durch den Torsionswinkel die Grösse der Kraft gemessen.

Die Fig. 207 stellt das Instrument dar.

Ein Paar cylindrisch geformter beweglicher Spulen umschliesst zwei ovale feste Spulen, so dass die Windungsebenen beider Spulensysteme zu einander senkrecht stehen. Die beiden festen Spulen sind über einander zwischen zwei Messingsäulen angeordnet, die in eine mit drei Fussschrauben und einer Dosenlibelle versehene Hartgummiplatte eingesetzt sind. Die beiden Säulen endigen oben in einem horizontalen Messingring. Auf diesen Ring ist eine Spiegelglasplatte fest aufgelegt, die an ihrem Umfange eine eingeätzte Kreisteilung und in der Mitte eine Aufhängevorrichtung für das bewegliche Spulenpaar trägt. Die beiden untereinander fest verbundenen beweglichen Spulen sind an einem dünnen Metalldraht aufgehängt.

---

[1]) Grundzüge der Elektrotechnik, Kap. X, 4. d, S. 153.

[2]) Vergl. Grundzüge, Kap. X, 2., S. 146.

[3]) Auch das, Grundzüge Kap. X, 4., S. 158, beschriebene neuere Instrument von Weston kann für Präzisionsmessungen bei Wechselströmen in gleicher Weise verwendet werden.

Durch zwei oben und unten angebrachte schwache Spiralfedern wird der Strom in die Wickelungen der beweglichen Spulen geleitet. Die Quecksilbernäpfchen, in die bei dem Elektrodynamometer für starke Ströme die Enden der beweglichen Spule eintauchen (vergl. Grundzüge, Kap. IV, 2., S. 101), sind also hier durch diese achsial stehenden Spiralfedern ersetzt.

Die obere dieser beiden Federn, die zugleich als Torsionsfeder zur Messung der ablenkenden Kraft des Stromes dient, ist an einen Torsionsknopf angeschlossen, der sich in einem in der oberen Glasplatte befestigten Messingringe dreht. Der Torsionsknopf besteht aus zwei in einander gesteckten Messingcylindern, deren jeder oben in eine geränderte Scheibe ausläuft; durch eine am äusseren Cylinder angebrachte kleine Druckschraube ist der innere Cylinder in dem äusseren festgeklemmt. Unten am inneren Cylinder ist, von ihm durch Hartgummi isoliert, eine Messingscheibe befestigt; an diese ist die stromführende Torsionsfeder angeklemmt. Die Stromzuleitung übernimmt eine gegen den Umfang der Scheibe schleifende Bürste, die von einer der senkrechten Messingsäulen gehalten wird. Der Metallfaden, an dem die beweglichen Spulen hängen, ist durch die Achse des Torsionsknopfes isoliert hindurchgeführt und um einen Wirbel gewickelt. Auf diese Weise ist der Torsionsknopf von den stromführenden Teilen sorgfältig isoliert, so dass das Instrument ohne Gefahr auch für hohe Spannungen verwendet werden kann. Der äussere Cylinder des Torsionsknopfes trägt ferner einen dicht oberhalb der Glasteilung liegenden Zeiger. Ein zweiter Zeiger, dessen Spitze jedoch unter der Glasteilung spielt, ist wie beim Torsionsgalvanometer an dem beweglichen Spulensystem befestigt; zwei Messingarme, die von dem mittleren Verbindungsstück beider beweglichen Spulen ausgehen und gegen die beiden senkrechten Säulen anschlagen, schränken den Ausschlag des Zeigers auf einen kleinen Winkel ein.



Fig. 207. Elektrodynamometer von Siemens & Halske.

Durch eine auf der Grundplatte angebrachte Arretierungsschraube, die auf einen Winkelhebel wirkt, kann das bewegliche Spulensystem

gehoben, gegen einen von einer der Säulen ausgehenden Arm angedrückt und dadurch festgestellt werden, so dass der Aufhängefaden und die Spiralfedern beim Transport des Instruments nicht beschädigt werden können.

Die Windungen sämtlicher Spulen sind hintereinander geschaltet; die Stromrichtung und die Windungszahlen der beiden beweglichen Spulen sind so gewählt, dass die magnetischen Wirkungen der beiden übereinander liegenden Spulen genau gleich und entgegengesetzt gerichtet sind. Die beiden Spulen bilden daher ein astatisches System, auf das äussere Magnetfelder im allgemeinen keine ablenkende Wirkung ausüben können.

Vorn auf der Grundplatte befinden sich drei Messingklötze. Die beiden äusseren Klötze tragen die Anschlussklemmen des Apparates, zwischen dem mittleren und linken Klotze liegt die Elektrodynamometerwickelung, zwischen dem mittleren und rechten Klotze ist ein unterhalb der Grundplatte angebrachter Vorschaltwiderstand eingeschaltet, der durch Einsetzen eines Stöpsels zwischen beide Klötze kurzgeschlossen werden kann. Durch Kurzschliessen dieses Vorschaltwiderstandes wird der Widerstand des Instrumentes auf die Hälfte herabgesetzt, der Ausschlag daher auf das Doppelte erhöht.

Das astatische Elektrodynamometer wird für Messbereiche von 15 — 90 Volt oder 30 — 180 Volt oder 120 — 720 Volt geliefert. Durch Vorschalten eines induktionsfreien Widerstandes kann der Messbereich des Instruments bis auf 3240 Volt erweitert werden.

Beim Gebrauch stellt man das Elektrodynamometer auf einen möglichst festen Tisch und bringt durch Verstellen der Fussschrauben die Dosenlibelle zum Einspielen. Dann löst man die Arretierungsschraube, bis das bewegliche Spulenpaar frei schwebt, und dreht den Torsionsknopf, so dass der Torsionszeiger über dem Nullpunkt der Skala liegt. Dann spielt auch der mit den beweglichen Rollen verbundene Zeiger auf Null ein.

Vor Ausführung der Messung entferne man den Stöpsel aus dem Schaltapparat, damit das Instrument zunächst eine geringe Empfindlichkeit besitzt, und verbinde darauf die Anschlussklemmen des Elektrodynamometers durch gut isolierte Drähte mit den beiden Punkten, deren Spannungsunterschied gemessen werden soll. Der durch die Spulen des Instrumentes fliessende Strom, der der Klemmenspannung proportional ist, erteilt dem Zeiger des beweglichen Spulenpaares eine Ablenkung entgegengesetzt der Drehung des Uhrzeigers. Durch Rechtsdrehen des Torsionsknopfes bringt man den beweglichen Zeiger auf den Nullpunkt der Skala zurück. Der Torsionswinkel α, um den der Zeiger des Torsionsknopfes hierbei gedreht werden muss, dient als Mass für den gesuchten Spannungsbetrag. Die Skala ist

derart geteilt, dass an ihr direkt die Quadratwurzeln aus den Ablenkungen abgelesen werden können. Es ist daher die abgelesene Ziffer nur noch mit einer Konstanten zu multiplizieren, um sofort den Wert der Spannung zu ergeben. Ist die Ablenkung des Torsionszeigers zu klein, um eine genaue Ablesung zu erlauben, so setzt man den Stöpsel zwischen den mittleren und rechten Schaltklotz ein und erhält dadurch die doppelte Empfindlichkeit des Instrumentes. Es empfiehlt sich, die Messung schnell vorzunehmen, damit keine beträchtliche Erwärmung der Drahtwickelung eintreten kann, die den Widerstand der Spulen ändern und kleine Fehler der Messung hervorrufen würde.

Durch die pendelnden Schwingungen des beweglichen Spulensystems wird es oft erschwert, den Torsionszeiger so einzustellen, dass der bewegliche Zeiger genau und ruhig auf dem Nullpunkt steht; man kann jedoch diese störenden Schwingungen sehr schnell abdämpfen, wenn man den Torsionsknopf im Takte der Pendelschwingungen, der jedesmaligen Bewegungsrichtung des beweglichen Zeigers entgegen, um einen sehr kleinen Winkel hin und her dreht.

Verwendet man das Elektrodynamometer zur Messung der Spannung an einem Wechselstromkreise oder an einem Zweige eines Drehstromkreises, so ist der durch das Instrument fliessende Strom i:

$$i = \frac{E}{\sqrt{w^2 + 4\pi^2 \sim^2 L^2}} \quad \ldots \ldots \quad 6)$$

wenn w der Ohm'sche Widerstand, $\sim$ die Periodenzahl des Wechselstromes und L der Selbstinduktionskoëffizient des Instrumentes ist. Die gesuchte effektive Spannung des Stromkreises ist alsdann:

$$E = C \cdot w \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \sim^2 L^2}{w^2}} \quad \ldots \quad 7)$$

C ist eine Konstante.

Es ist:

$$E = K \cdot \sqrt{\alpha} \cdot F \quad \ldots \ldots \quad 8)$$

wenn $C \cdot w = K$ gesetzt und mit F ein von der Periodenzahl abhängiger Korrektionsfaktor

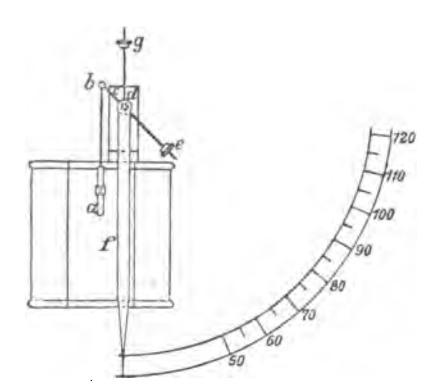
$$F = \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \sim^2 L^2}{w^2}} \quad \ldots \ldots \quad 9)$$

bezeichnet wird. Dieser Korrektionsfaktor F kann fast immer unberücksichtigt bleiben, da das Elektrodynamometer so konstruiert ist, dass sein Induktionskoëffizient L sehr klein gegen seinen Widerstand w ist. Für nicht zu grosse Werte der Periodenzahl $\sim$ weicht der Wert des Korrektionsfaktors F nur sehr wenig von 1 ab. Nur wenn eine sehr grosse Genauigkeit der Messung verlangt wird,

oder wenn man mit Strömen von hoher Wechselzahl arbeitet, wird man den Korrektionsfaktor mit Hilfe der in der Aichungstabelle des Instruments angegebenen Werte von L, ~ und w für den bekannten Wert von ~ berechnen.

3. Spannungszeiger von Siemens & Halske.

Der Spannungszeiger besteht aus einer mit Kupferdraht gewickelten Spule, die als aus drei über einander befindlichen Spulen von gleichem inneren Durchmesser zusammengesetzt betrachtet werden kann, von denen die oberste den kleinsten, die unterste aber den grössten äusseren Durchmesser besitzt. Über der Spule schweben, teilweise in diese hineinragend, nahe der Wandung ein oder zwei Eisenstäbchen a (vergl. Fig. 208). Diese hängen an einem dünnen, in einer Öse b endigenden Drahte c, die durch ein kleines



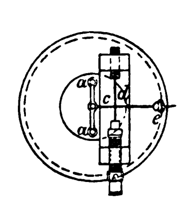


Fig. 208. Schematische Darstellung des Wechselstrom-Spannungszeigers von Siemens & Halske.

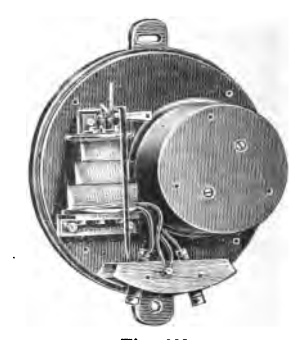


Fig. 209. Spannungszeiger von Siemens & Halske.

Loch am Ende eines Hebelarmes geführt ist, der auf einer den Zeiger tragenden Achse d angebracht ist. Tritt an den Instrumentenklemmen eine Spannungsdifferenz auf, durchfliesst also die Spulen ein Strom, so wird das Eisenstäbchen, je nach der Stärke desselben, mehr oder weniger tief in jene hineingezogen, und die geradlinige Bewegung des Eisenstäbchens bewirkt eine drehende des Zeigers, deren Grösse ein Mass für die an den Klemmen des Instrumentes herrschende Spannung bildet. Der Zeiger f ist fest mit dem Rahmen und der Achse verbunden und stellt sich, so lange kein Strom durch die Spule fliesst, vertikal. Um die Empfindlichkeit nach Bedarf ändern zu

können, ist in der Verlängerung des Zeigers noch ein Stäbchen angebracht, auf dem ein Laufgewicht g verschoben werden kann.

Um einerseits dem Instrumente als Spannungszeiger den nötigen Widerstand zu verleihen und anderseits seine Angaben von den durch die Stromwärme und die Schwankungen der äusseren Temperatur hervorgerufenen Änderungen seines Widerstandes unabhängig zu machen, liegt zwischen den Instrumentenklemmen noch in Hintereinanderschaltung mit der Kupferspule eine mit Manganindraht bifilar bewickelte Rolle in einem im Sockel des Spannungszeigers angebrachten Gehäuse, die den fünffachen Widerstand der zu ihr gehörigen Kupferspule besitzt. (Vergl. Fig. 209.)

Die Spannungszeiger für mehr als 300 Volt erhalten, da es nicht möglich ist, den ganzen von ihnen benötigten Vorschaltwiderstand im Instrumente selbst unterzubringen, einen besonders, gefertigten Zusatzwiderstand, der einen Teil des Manganindrahtes des Vorschaltwiderstandes enthält.

Das eingeschaltete Instrument verbraucht wenig mehr als 1 Watt, und der mittlere Fehler bei dauernder Einschaltung erreicht nicht ganz 1%. Gegen in der Nähe vertikal verlaufende stromführende Drähte ist das Instrument ziemlich unempfindlich, weil deren Kraftlinien horizontal verlaufen.

Fig. 210. Einrichtung des Hitzdrahtvoltmeter von Hartmann & Braun.

Horizontale, stärkere Ströme führende Drähte dürfen nicht in nächster Nähe des Apparates vorübergeleitet werden, und das wird ein geschickter Monteur immer vermeiden können.

4. Die Hitzdrahtvoltmeter von Hartmann & Braun.

Messinstrumente für Wechselströme, deren Angaben auf der Verlängerung eines vom Strome durchflossenen Drahtes beruhen, haben vor den auf elektromagnetischen und elektrodynamischen Prinzipien beruhenden Instrumenten den grossen Vorteil, dass sie frei von Selbstinduktion und völlig unabhängig von der Wechselzahl und der Form der Spannungskurve sind, und dass benachbarte Magnetfelder ihre Angaben nicht beeinflussen. Die neuere Anordnung, die von A. Asch in Firma Hartmann & Braun (Bockenheim-Frankfurt a. M.) herrührt, ist gegenüber der früher beschriebenen Einrichtung des Hitzdrahtvoltmeters von Cardew[1]) wesentlich vereinfacht und erheblich vervollkommnet. Viele Tausend solcher Apparate sind jetzt

[1]) Grundzüge, Kap. X, 4. e), S. 154.

bereits in grösseren und kleineren Wechselstromanlagen mit bestem Erfolge in Betrieb.

Ein aus einer Legierung von Platin und Silber bestehender dünner Draht ist einerseits am Punkte a und anderseits an einer Regulierschraube s befestigt. (Vergl. Fig. 210.) Durch diesen Draht fliesst der Strom, der gemessen werden soll. Da der Widerstand dieses dünnen Drahtes d gross ist, wird der Draht durch die Stromwärme des durchgehenden Wechselstromes erwärmt. Der Draht dehnt sich aus und senkt sich in der Mitte, da seine Enden unbe weglich sind.

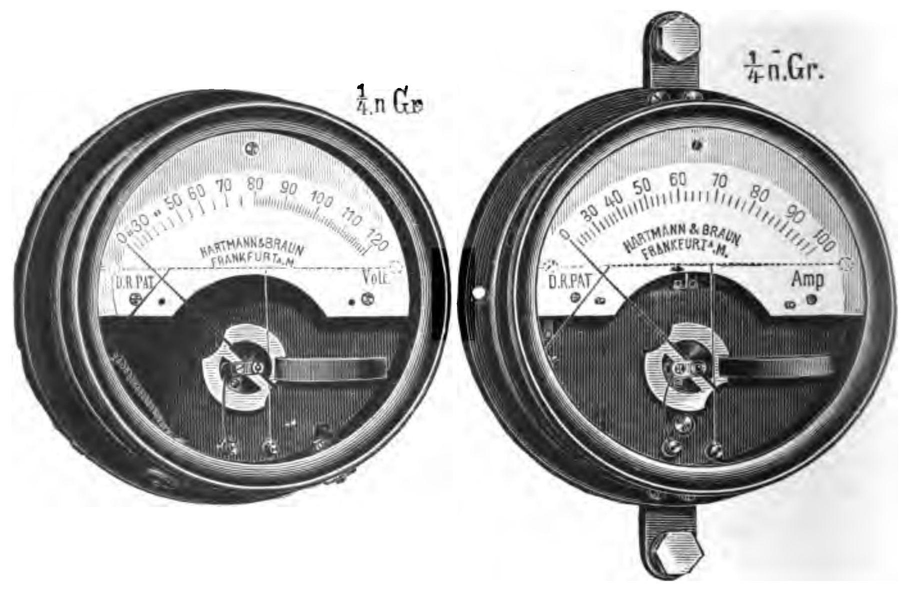


Fig. 211. Hitzdrahtvoltmeter von Hartmann & Braun.

Fig. 212. Hitzdrahtstromzeiger von Hartmann & Braun.

In der Mitte dieses Drahtes und bei q ist ein dünner Messingdraht m befestigt, an dem ein Faden angehängt ist. Der Faden ist um die auf der Achse des Zeigers befestigte Rolle c herumgeschlungen und wird durch eine Blattfeder p gespannt. Die Durchbiegung der Drähte d. und m wird auf diese Weise auf einen Zeiger z übertragen, der vor einer empirisch geteilten Skala spielt.

Die Zeigerachse ist sorgfältig in Steinen gelagert, so dass die Reibung nur äusserst gering ist.

Unmittelbar über dem Arbeitsdrahte d befindet sich ein aus Aluminium hergestelltes kleines Schutzdach, um der Entstehung aufsteigender Luftströme möglichst vorzubeugen.

Die Platte, auf der sich die sorgsam isolierten Befestigungspunkte des Drahtes s und a befinden, ist aus zwei Teilen zusammengesetzt; sie besteht aus einer Eisenplatte und einer Messingplatte. Die Breiten dieser beiden Stücke sind derart bemessen, dass der Ausdehnungskoëffizient der zusammengesetzten Platte dem des Drahtes d genau gleich ist. Auf diese Weise wird verhindert, dass eine Temperaturänderung der Umgebung des Apparates eine Veränderung der Angaben des Instrumentes, durch Vergrösserung oder Verkleinerung des Abstandes der Punkte s und a, bewirkt.

Um Schwankungen beim Einstellen des Zeigers möglichst zu verhüten und das Instrument möglichst aperiodisch zu machen, ist an die Zeigerachse noch eine Metallscheibe angebracht, die sich zwischen den Polen eines kräftigen Magneten bewegt. Dadurch wird auch die Zeigerstellung gegen Schwankungen und Erschütterungen so unempfindlich, dass man die Instrumente selbst auf Schiffen gut verwenden kann.

In Fig. 211, die das Äussere des Apparates erkennen lässt, ist diese Scheibe und rechts unten auch der Magnet zu sehen.

Soll das Instrument für höhere Spannungen benutzt werden, so wird dem Arbeitsdrahte noch ein induktionsfreier Widerstand aus Konstantan [1]) vorgeschaltet.

Auch Stromzeiger werden nach demselben Prinzipe gebaut. Fig. 212 zeigt z. B. ein derartiges Hitzdrahtampèremeter. Da dann der ganze zu messende Strom durch den Arbeitsdraht hindurch gehen muss, ist selbstverständlich ein gewisser Spannungsverlust durch den Apparat unvermeidlich; derselbe ist jedoch gering und liegt zwischen 0,2 und 3 Volt. Durch auswechselbare Bleisicherungen, die derartigen Instrumenten vorgeschaltet werden, werden sie vor Überanstrengung geschützt.

Da diese beiden Arten von Messvorrichtungen auch ebenso gut für Gleichstrom brauchbar sind, kann man sie mit Gleichstrom aichen und die Angaben dann ohne weiteres für Wechselstrom benutzen.

5. Messung der Stromstärken von Wechselströmen.

Obgleich wir schon in den Grundzügen der Elektrotechnik (Kap. VI, 2., S. 101, und Kap. IX, 5., S. 144) das wichtigste Instrument für die Messung von Wechselströmen, das Elektrodynamometer, und seinen Gebrauch ausführlich beschrieben haben und dieser Apparat für die meisten Bedürfnisse des Fachmannes genügt, so ist

---

[1]) Vergl. Grundzüge, Kap. XII, 1, Anm. zu S. 177.

er doch nicht geeignet, in der Praxis als Stromzeiger für die eine Wechselstromanlage bedienenden Arbeiter verwendet zu werden.

Für solche Zwecke benutzt man gewöhnliche Ampèremeter, die eine Spule besitzen, die nur aus einer oder ganz wenigen Windungen besteht, und in deren Felde sich ein ganz kleiner oder ein aus einzelnen von einander isolierten dünnen Blechen oder Drähten bestehen- Eisenkörper mit kurzer magnetischer Achse bewegt.

Die Hummel'schen Ampèremeter (Grundzüge, Kap. IX, 4a, S. 139), der Strommesser von Hartmann & Braun (a. a. O., S. 140), das Ampèremeter von Siemens & Halske (a. a. O., S. 141) und viele andere Instrumente erfüllen diese Bedingungen und sind sehr wohl brauchbar, wenn sie nach einem Elektrodynamometer mit einem Wechselstrom von derselben Periodenzahl und der gleichen Form der Stromkurve geaicht werden.

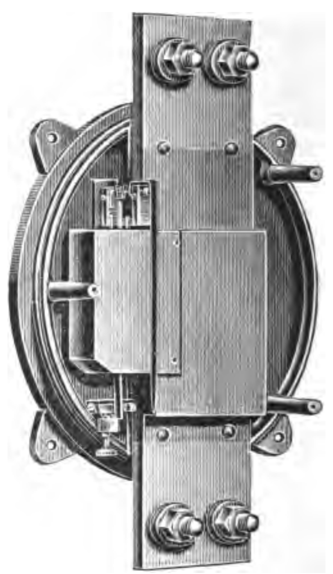




Fig. 213.
Stromzeiger von Siemens & Halske.

Fig. 214. Stromzeiger für sehr starke Ströme von Siemens & Halske.

6. Stromzeiger von Siemens & Halske.

Die für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom bestimmten Stromzeiger der Firma Siemens & Halske werden für niedere Stromstärken, bis 50 Ampère, so gebaut, wie die Spannungszeiger. Jedoch besteht die Spule nicht aus drei über einander gelagerten Teilen von gleichen inneren, aber verschieden grossen äusseren Durchmessern, sondern die Spule bildet einen einzigen Hohlcylinder von durchweg gleichmässigem äusseren Radius. Ebenso fällt bei dem Stromzeiger der mit Manganindraht gewickelte Vorschaltwiderstand fort, und ferner werden die Anschlussklemmen resp. Anschlussstücke anders wie beim Spannungs-

zeiger, entsprechend der maximalen Stromstärke, für die das Instrument bestimmt ist, dimensioniert. Mit dem bei den Spannungszeigern der obigen Firma zur Verwendung gelangenden System mit einem Eisenstäbchen, Öse und einer Achse werden nur die Stromzeiger für Stromstärken bis 50 Ampère versehen; die für höhere Stromstärken gebauten erhalten ein System mit zwei Eisenstäbchen, das statt der beiden Ösen eine zweite Achse besitzt. (Vergl. Fig. 213.)

Die Spulen der Stromzeiger für Ströme bis 50 Ampère werden aus besponnenem Kupferdraht hergestellt. Für Ströme von 50 bis 300 Ampère gelangen aus blankem Flachkupferband gefertigte Spulen zur Anwendung oder Kupferspulen, deren Windungen durch geeignetes Ausfräsen massiver Kupfercylinder erhalten worden sind. Für noch höhere Stromstärken benutzt man Spulen, die nur eine einzige Windung besitzen, die, wie die Fig. 214 zeigt, nicht mehr cylindrische Form haben, sondern aus Flachkupfer zusammengebaut werden und dann das Aussehen eines flachen Kastens haben.

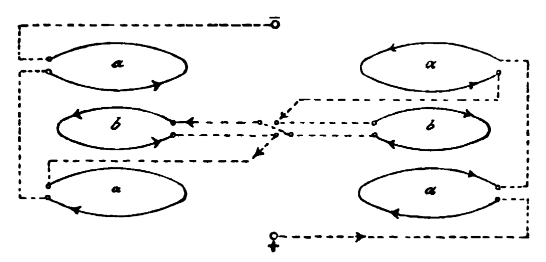


Fig. 215. Stromlauf der Stromwage von W. Thomson.

Den Stromzeigern für Ströme bis maximal 50 Ampère werden, wie dem Spannungszeiger, nebeneinander am unteren Teile des Sockels befindliche Anschlussklemmen gegeben, während die Instrumente für höhere Stromstärken als 50 Ampère Anschlussstücke aus Flachkupfer erhalten, die oben und unten am Sockel befestigt sind und deren Querschnitt der maximalen Stromstärke, für die der Apparat bestimmt ist, entspricht.

Da die Wirkung der Strom- und Spannungszeiger von der Firma Siemens & Halske auf der anziehenden Kraft beruht, die eine Spule auf ein oder zwei über ihr aufgehängte Eisenstäbchen ausübt, und Angaben derartiger Instrumente nicht nur für Gleich- und Wechselstrom verschieden sind, sondern bei Wechselstrom auch je nach der Periodenzahl und der Gestalt der Stromkurve anders ausfallen, so muss ihre Aichung mit der Stromart erfolgen, für die sie bestimmt sind, also für Gleichstrom mit Gleichstrom und für Wechsel- und Drehstrom mit Wechselstrom und zwar mit Wechsel-

strom derselben Wechselzahl und derselben Kurvengestalt, wie sie in dem Leitungsnetze vorhanden sind, an das später der betreffende Messapparat angeschlossen werden soll. Falls dies nicht beachtet wird, kann man später an den Instrumenten um mehrere Prozent fehlerhafte Angaben erhalten.

7. Thomson's elektrodynamische Stromwage.

Während bei dem Elektrodynamometer von Siemens & Halske die feste und die bewegliche Spule vertikal stehen und der elektrodynamischen Anziehung durch die elastische Gegenkraft einer Torsionsfeder das Gleichgewicht gehalten wird, sind bei der von Lord Kelvin (Sir William Thomson) konstruierten Stromwage[1]) an einem Wagebalken zwei bewegliche Spulen horizontal angeordnet, die sich zwischen zwei ebenfalls horizontal liegenden Spulenpaaren bewegen können. Sowohl die beiden beweglichen Spulen, als die beiden festen Spulenpaare werden von dem zu messenden Wechselstrome durchflossen und zwar in dem Sinne, dass die Wirkungen der vier festen Spulen die beiden an dem Wagebalken angebrachten beweglichen Spulen in demselben Sinne zu bewegen streben. Der Stromlauf, beziehungsweise die Schaltung der Spulen, ist aus der umstehenden Skizze (Fig. 215) ersichtlich. Man erkennt, dass die linke bewegliche Spule von der darunter befindlichen festen Spule abgestossen, von der darüber befindlichen festen Spule aber angezogen wird, während die rechte bewegliche Spule von der darunter gelegenen festen Spule angezogen, von der darüber gelegenen festen Spule abgestossen wird. Da der zu messende Strom die beiden beweglichen Spulen in entgegengesetztem Sinne durchfliesst, wird jeder Einfluss der Vertikalkomponente des Erdmagnetismus oder anderer in der Nähe des Apparates wirksamer magnetischer Kräfte aufgehoben.

Der Wagbalken hängt an einem äusserst biegsamen, aus vielen dünnen Kupferdrähten gebildeten Bande, welches gleichzeitig zur Zuführung des Stromes dient. Ein ebensolches Band bewerkstelligt auch die Abnahme des Stromes aus den beweglichen Spulen. Da die Drähte dieser Bänder nackt sind und frei liegen, so können sie trotz ihres geringen Querschnittes mit verhältnismässig grossen Stromstärken belastet werden. Die Spulen bestehen aus einer oder mehreren Windungen; für grössere Stromstärken sind sie aus mehreren von einander isolierten Drähten hergestellt. Die Grösse der zwischen den feststehenden und beweglichen Spulen auftretenden elektrodynamischen Wirkungen wird durch Gewichte ermittelt, die längs des Wagebalkens solange verschoben werden, bis er in seine

[1]) Derartige Messinstrumente werden von James White in Glasgow angefertigt.

Gleichgewichtslage einspielt. Die Verschiebung der Gewichte kann durch Ziehen an den in der Fig. 216 mit abgebildeten Schnüren erfolgen.

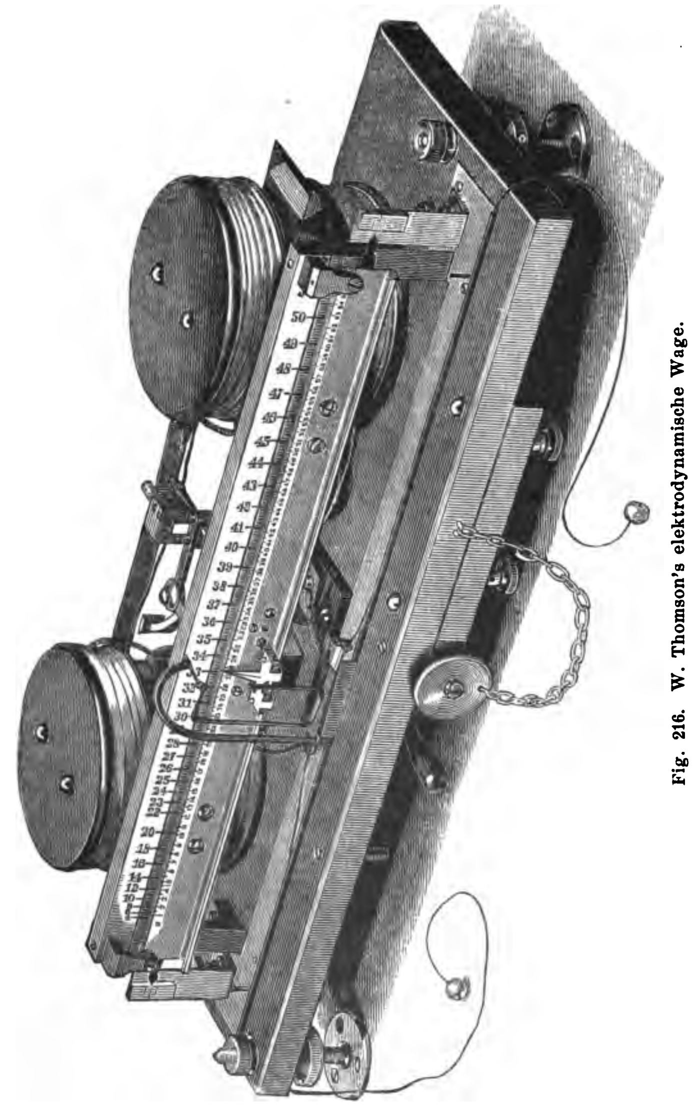


Fig. 216. W. Thomson's elektrodynamische Wage.

Die Ablesung erfolgt entweder an der oberen oder an der unteren Skala.

Zu jedem Instrumente gehören vier Gewichte und Gegengewichte,

deren wirksame Grössen sich wie die Zahlen 1 : 4 : 16 : 64 verhalten. Das erste Paar bildet der in der Fig. 216 sichtbare Schlitten und sein Gegengewicht; beim zweiten Paare werden rechts und links die ersten Zusatzgewichte beigegeben; beim dritten Paare die zweiten Zusatzgewichte u. s. f. aufgelegt.

Einem Teilstriche der direkten Teilung, die von 0 bis 50 geht, entspricht z. B. bei der Dekaampèrewage,

wenn	das	1.	Gewichtspaar	aufliegt,	0,25	Ampère
»	»	2.	»	»	0,50	»
»	»	3.	»	»	1,00	»
»	»	4.	»	»	2,00	»

Der Messbereich dieser Wage geht somit von 0,25 bis 100 Ampère.

Solche Wagen werden in mehreren Grössen für sehr verschiedene Messbereiche hergestellt.

Man erhält die gemessene Stromstärke, wenn man die Wurzel aus der Ablesung an der unteren Skala oder die Ablesung an der oberen direkten Teilung mit einer Konstanten multipliziert.

Das Auflegen der Gewichte geschieht durch einen Hebel, dessen Griff links neben dem Arretierungsknopfe zu sehen ist.

8. Arbeitsmessung bei Wechselstrom.

Da die Arbeit eines elektrischen Stromes zumeist in Watt ausgedrückt wird, führen die zur Messung derselben dienenden genauen Messinstrumente den Namen Wattmeter; einfachere für den Gebrauch in elektrischen Anlagen bestimmte Zeigerapparate, an die man geringere Ansprüche hinsichtlich der Genauigkeit stellen kann, nennt man Wattzeiger.

Die Wattmeter oder elektrischen Arbeitsmesser

sind Elektrodynamometer, deren eine Spule von dem Hauptstrom durchflossen wird, während die andere Spule in einem induktionsfreien Nebenschluss mit hohem Widerstande liegt, so dass der sie durchfliessende Strom der Spannung proportional ist.

Derartige Apparate sind von verschiedenen grösseren Firmen konstruiert worden, die sich mit Messungen an Wechselströmen zu befassen haben. Eines der bekanntesten und bewährtesten Instrumente dieser Art ist das von Ganz & Co. in Budapest herrührende Wattmeter von O. T. Bláthy.[1]) Da dieses Instrument aber schon vielfach anderwärts beschrieben worden ist, geben wir hier nur die

[1]) Eine genauere Beschreibung des Ganz'schen Wattmeters und seines Gebrauches findet man z. B. in A. Cl. Feldmann, Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung der Wechselstrom-Transformatoren, Leipzig, O. Leiner, S. 261. Vergl. auch Grundzüge d. Elektrotechnik Kap. XI, 3., S. 161.

und folgen in der Hauptsache einer Darstellung, die uns von der genannten Firma freundlichst zur Verfügung gestellt worden ist.

Die nebenstehende Abbildung (Fig. 217) stellt dieses Instrument dar.

Die dickdrähtige, vom Hauptstrome durchflossene Spule ist fest und besteht aus zwei parallelen Wickelungen, von denen die eine verwendet wird, wenn es sich um die Messung schwächerer Ströme handelt, die andere, wenn stärkere Ströme zu messen sind. Die Enden dieser vier Spulen sind zu je zwei Klemmen geführt, deren Anordnung auf der Fussplatte des Instrumentes aus der Schaltungsskizze Fig. 218 zu erkennen ist. Die Klemmen J und J' sind die Enden der dickdrähtigen, i und i' die Enden der aus weniger dickem Drahte bestehenden vom Hauptstrome durchflossenen festen Spule.

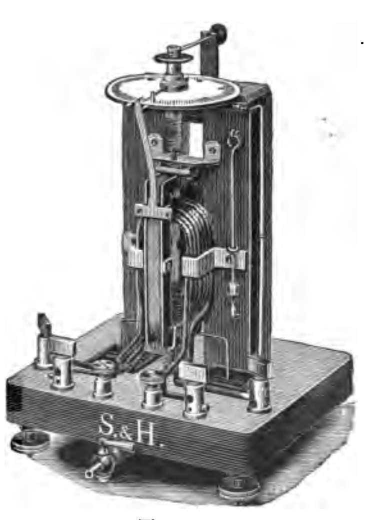


Fig. 217.
Wattmeter von Siemens & Halske.

Ein beweglicher Rahmen, der an einem dünnen Faden aufgehängt ist, trägt die von einem der Spannung proportionalen, schwachen Strome durchflossene, aus vielen Windungen bestehende Spannungsspule. In der Gleichgewichtslage stehen die Windungen der beweglichen senkrecht zu denen der festen Spule.

Ganz ähnlich wie bei dem vorher (S. 292) beschriebenen Elektrodynamometer wird der beweglichen Spule der Strom durch zwei Spiralfedern zugeführt, von denen die eine oben den Aufhängefaden umgiebt und am Torsionsknopfe befestigt ist, während die andere am unteren Ende des Rahmens angebracht ist. Durch gut isolierte Drähte stehen diese Spiralfedern mit den Klemmen e und e' in leitender Verbindung. Die Messung der von der festen auf die bewegliche Spule ausgeübten Anziehungskraft erfolgt, ganz wie bei den Elektrodynamometern von Siemens & Halske, durch die elastische Gegenkraft der Torsion der oberen Feder.[1])

Während man den zu messenden Hauptstrom durch eine der feststehenden Spulen hindurch gehen lässt, sendet man einen der Spannung proportionalen schwachen Strom durch die bewegliche

---

[1]) Vergl. S. 292 und Grundzüge der Elektrotechnik, Kap. VI, 2., S. 101.

Spule. Für Ströme unter 25 Ampère legt man die den Hauptstrom führenden Drähte an die Klemmen i und i', für stärkere Ströme benutzt man die Klemmen J und J'.

Von der Klemme e' führt man einen Draht zu dem induktionsfreien Vorschaltwiderstand und von da an einen der beiden Punkte, zwischen denen man die Spannung messen will; den anderen Punkt verbindet man durch einen Leitungsdraht mit der Klemme e.

Dem Instrument wird daher ein induktionsfrei gewickelter, in mehrere Stufen eingeteilter Vorschaltwiderstand aus Rheotandraht beigegeben, der entweder ganz oder abteilungsweise vor die bewegliche Spule geschaltet wird. Der Vorschaltwiderstand soll den Widerstand der beweglichen Spule so sehr überwiegen, dass der Einfluss der Selbstinduktion der Spule verschwindend klein ist und in den meisten Fällen vernachlässigt werden darf.

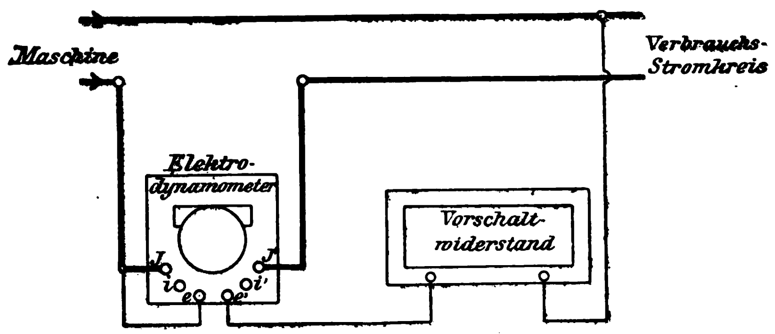


Fig. 218. Schaltung des Wattmeters bei Arbeitsmessungen eines Wechselstromes.

Ist die ungefähre Stärke des Nutzstromes nicht bekannt, so nimmt man für den Nutzstrom zuerst immer die stärkere Wickelung der festen Spule und schaltet den gesamten verfügbaren Widerstand vor die bewegliche Spule. Die bewegliche Spule darf sich nur mässig erwärmen; in der jedem Instrument beigegebenen Aichungstabelle ist deshalb die Stromstärke angegeben, die nicht überschritten werden soll. Es ist ferner bei der Schaltung darauf zu achten, dass zwischen den Spulen des Elektrodynamometers keine hohen Spannungen auftreten. Man wird deshalb den aus beweglicher Spule und Vorschaltwiderstand bestehenden Nebenschlusskreis stets so zwischen die beiden zum Verbrauchskreise führenden Zuleitungen legen, dass die feste und die bewegliche Spule an dieselbe Zuleitung angeschlossen sind, indem man die Klemme e der beweglichen Spule (Fig. 218) mit der Klemme J der festen Spule verbindet. Würde man umgekehrt verfahren, also die feste Spule und den Vorschaltwiderstand an die eine Zuleitung, die bewegliche Spule an die andere

Zuleitung legen, so würde bei hochgespannten Strömen zwischen fester und beweglicher Spule eine beträchtliche Spannung auftreten, die ein Überspringen von Funken und infolge dessen Beschädigungen der Spulen verursachen könnte.

Um ein längeres Hin- und Herschwanken der beweglichen Spule zu vermeiden, ist das Elektrodynamometer mit Flüssigkeitsdämpfung versehen; zwei mit der beweglichen Spule verbundene Flügel tauchen in zwei in das Grundbrett des Instrumentes eingelassene Näpfe ein, die mit einer nichtleitenden Flüssigkeit[1]) zu füllen sind. Zum Entleeren und Ausspülen der Näpfe dient ein kleiner an der Vorderkante des Grundbrettes angebrachter Hahn. (Vergl. Fig. 217).

Die von einem Wechselstrome geleistete Arbeit A wird, sofern die Strom- und Spannungskurven nahezu die Gestalt einer Sinoide haben, ausgedrückt durch das Produkt:

$$A = J \cdot E \cdot \cos \chi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

wenn J die effektive Stromstärke, E die effektive Spannung und χ den Winkel der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bedeutet.

Der Fehler, der durch eine wesentlich von der Sinoide abweichende Form der Strom- und Spannungskurve veranlasst wird, kann bei Messungen in der Praxis ohne weiteres vernachlässigt werden.

Infolge der Selbstinduktion der beweglichen Spule erleidet der schwache Strom i, der durch die bewegliche Spule fliesst, eine weitere Phasenverschiebung φ gegen die Spannung, so dass

$$i \cdot (W + w) = E \cdot \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

gesetzt werden muss. Die durch die feste und durch die bewegliche Spule des Elektrodynamometers fliessenden Ströme besitzen daher einen Phasenunterschied $\chi - \varphi$, so dass sich

$$J \cdot i \cdot \cos (\chi - \varphi) = C \cdot \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

ergiebt, wobei C eine dem Instrumente eigentümliche Konstante und α der Torsionswinkel ist. Aus den Gleichungen 10) bis 12) folgt:

$$A = C \cdot \alpha \cdot (W + w) \cdot \frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)} \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

wenn man mit W und w die Widerstände der beweglichen Spule und des Vorschaltwiderstandes bezeichnet.

Der Korrektionsfaktor

$$F = \frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

mit dem man den aus dem abgelesenen Torsionswinkel direkt sich er-

[1]) Siemens & Halske schlagen reines Wasser vor; wir geben einer Füllung mit reinem Petroleum den Vorzug.

gebenden Wert $C \cdot a \cdot (W + w)$
zu multiplizieren hat, ist fast immer nahezu 1, sodass er für den praktischen Gebrauch zu vernachlässigen ist, weil durch Vorschalten des grossen induktionsfreien Widerstandes die durch die Selbstinduktion der beweglichen Spule hervorgerufene Phasenverschiebung φ sehr klein gemacht wird. Zur Bestimmung des Korrektionsfaktors F bedarf man der Kenntnis des Selbstinduktionskoëffizienten l und des Widerstandes w der beweglichen Spule, deren Werte aus der Aichungstabelle zu entnehmen sind, ferner des Selbstinduktionskoëffizienten L und des Widerstandes R des Arbeitskreises und der Periodenzahl $\sim$ des Wechselstromes. Der oben für den Korrektionsfaktor F angegebene Ausdruck lässt sich auf die Form bringen:

$$F = \frac{1 + \mathrm{tg}^2 \varphi}{1 + \mathrm{tg}\, \varphi \cdot \mathrm{tg}\, \chi}.$$

Aus den beiden Gleichungen:

$$\mathrm{tg}\, \varphi = \frac{2 \pi \sim l}{W + w} \quad \dots\dots\dots \quad 15)$$

und

$$\mathrm{tg}\, \chi = \frac{2 \pi \sim L}{R} \quad \dots\dots\dots \quad 16)$$

ergiebt sich dann der Korrektionsfaktor:

$$F = \frac{1 + 4 \pi^2 \sim^2 \cdot \frac{l^2}{(W + w)^2}}{1 + 4 \pi^2 \sim^2 \cdot \frac{l}{W + w} \cdot \frac{L}{R}} \quad \dots\dots \quad 17)$$

Der Selbstinduktionskoëffizient L und der Widerstand R des Arbeitskreises sind meist nicht bekannt. Man findet die Phasenverschiebung $\chi - \varphi$ nach der Gleichung

$$\cos (\chi - \varphi) = \frac{C \cdot a \cdot (W + w)}{J \cdot E \cdot \cos \varphi} \quad \dots\dots \quad 18)$$

wenn man die Stromstärke J und die Spannung E des Nutzstromes mit Hilfe eines geeigneten Strom- und Spannungszeigers oder eines Elektrodynamometers für Strommessungen und eines astatischen Elektrodynamometers für Spannungsmessungen besonders bestimmt und $\cos \varphi$ mit Hilfe von Gleichung 15) berechnet.

Der Korrektionsfaktor F besitzt den Wert 1 für $\varphi = 0$ und $\varphi = \chi$; in diesen Fällen ist also keine Korrektion erforderlich. Seinen grössten Einfluss übt er bei $\varphi = \frac{\chi}{2}$ aus. Über die Grösse der Korrektion möge folgendes Zahlenbeispiel Aufschluss geben. Die bewegliche Spule des Elektrodynamometers habe den Widerstand = 200 Ohm und den Selbstinduktionskoëffizienten l = 0,07 Henry.

Durch passende Verwendung des Vorschaltwiderstandes soll der Strom der beweglichen Spule auf etwa 0,03 Ampère gehalten werden. Als Periodenzahl sei $\sim = 50$ angenommen. Es ergiebt sich dann folgende Tabelle:

Klemmen-spannung Volt	Korrektion von A in Prozenten für				
	$\chi = 0^0$	$\chi = 20^0$	$\chi = 40^0$	$\chi = 60^0$	$\chi = 80^0$
50	0,01741	— 0,46	— 1,08	— 2,22	— 6,94
100	0,00435	— 0,23	— 0,54	— 1,13	— 3,60
500	0,00017	— 0,04	— 0,11	— 0,23	— 0,74
1000	0,00004	— 0,02	— 0,06	— 0,11	— 0,37
2000	0,00001	— 0,01	— 0,03	— 0,06	— 0,19

Sieht man daher von den Fällen ab, in denen bei niedriger Betriebsspannung des Arbeitskreises die Phasenverschiebung des Nutzstromes gegen die Spannung sehr gross ist, so erkennt man, dass die Korrektion fast immer unberücksichtigt bleiben kann.

9. Arbeitszeiger für Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom von Siemens & Halske.

Vielfach hat man in der Praxis das Bedürfnis, fortwährend die jeweilige Arbeitsleistung einer elektrischen Anlage beurteilen zu können. Um die Verhältnisse einer Wechselstromanlage übersehen zu können, sind immer drei Messungen erforderlich, da sich die Wechselstromarbeit aus drei Faktoren zusammensetzt: Strom, Spannung und Cosinus der Phasenverschiebung.

Während also bei einer Gleichstromanlage zwei Messinstrumente: Stromzeiger und Spannungszeiger genügen, kommt bei einer Wechselstromanlage noch ein drittes Instrument hinzu, und das ist entweder ein Arbeitszeiger oder ein Phasenmesser.

Um eine Vorstellung davon zu geben, wie elektrische Arbeitszeiger für den Maschinenraum konstruiert werden können, beschreiben wir zunächst den

Arbeitszeiger für Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom von Siemens & Halske.

Das diesen Apparaten zu Grunde liegende Prinzip ist ebenfalls das elektrodynamometrische. Eine bewegliche, mit dünnem Kupferdraht bewickelte Spule befindet sich innerhalb einer festen, mit dickem Kupferdraht versehenen oder aus Flachkupfer hergestellten Spule. (Vgl. Fig. 219.) Der beweglichen Spule wird der Strom durch zwei isoliert auf der Achse befestigte Federn zugeleitet, die gleichzeitig die Gegenkraft

für die ablenkende Wirkung der Ströme bilden. Die Windungsflächen beider bilden einen stumpfen Winkel mit einander. Werden nun beide Spulen vom Strom durchflossen, so wird die bewegliche Spule bestrebt sein, sich mit ihrer Achse parallel derjenigen der festen zu stellen, so dass ihre Kraftlinien in derselben Richtung und in gleichem Sinne verlaufen wie diejenigen der festen. Der Winkel, den die bewegliche Spule hierbei beschreibt, ist proportional dem Produkte aus den beiden, die feste und die bewegliche Rolle durchfliessenden Strömen, so dass wir schreiben können:

$$J \cdot i = C\alpha,$$

wenn J, i die Ströme, α den Ausschlagswinkel und C eine von der Bauart des Apparates abhängige Konstante bedeutet. Schaltet man vor die bewegliche Spule, die den Widerstand w besitzen möge, soviel bifilar gewickelten, aus Manganindraht hergestellten Widerstand (W), dass der Gesamtwiderstand des beweglichen Spulenkreises als unabhängig von der in ihm erzeugten Stromwärme und der Lufttemperatur angesehen werden kann, so kann man statt i die an den Endpunkten des beweglichen Spulenkreises herrschende Spannung (e) einsetzen, also, da sehr angenähert

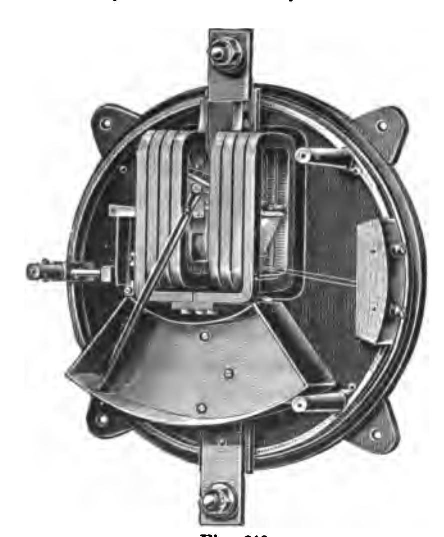


Fig. 219.
Arbeitszeiger von Siemens & Halske.

$$i = e : (W + w) \text{ ist:}$$

$$J \cdot e = C \cdot (w + W) \cdot \alpha.$$

Das Produkt $J \cdot e$ stellt bei Gleichstrom die zwischen den Punkten des Hauptkreises, zwischen denen $(w + W)$ liegt, geleistete Arbeit dar.

Bei Wechselstrom würde diese Arbeit

$$A = J \cdot e \cdot \cos \chi$$

sein, wenn χ den Winkel der zwischen Strom und Spannung im Hauptkreise herrschenden Phasenverschiebung bezeichnet. Bedeutet ferner φ den Winkel der Phasenverschiebung, die zwischen dem Strom in der beweglichen Spule und der an den Enden ihres Kreises bestehenden Spannung vorhanden ist, so erhalten wir für die Wechselstromarbeit den Ausdruck (vergl. S. 307, Gl. 13)

$$A = J \cdot e \cdot \cos \chi = C \cdot (W + w) \cdot \alpha \cdot \frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)} \quad . \quad 19)$$

Der Korrektionsfaktor

$$\frac{\cos \chi}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi - \varphi)}$$

wird $= 1$, wenn φ den Wert 0 annimmt, was sehr nahe durch geeignete Gestaltung der beweglichen Spule und durch passende Wahl des vor dieselbe geschalteten, bifilar gewickelten Manganin-Widerstandes erreicht werden kann und thatsächlich bei den Siemens'schen Arbeitszeigern sehr nahe erzielt wird. Die Folge davon ist, dass die

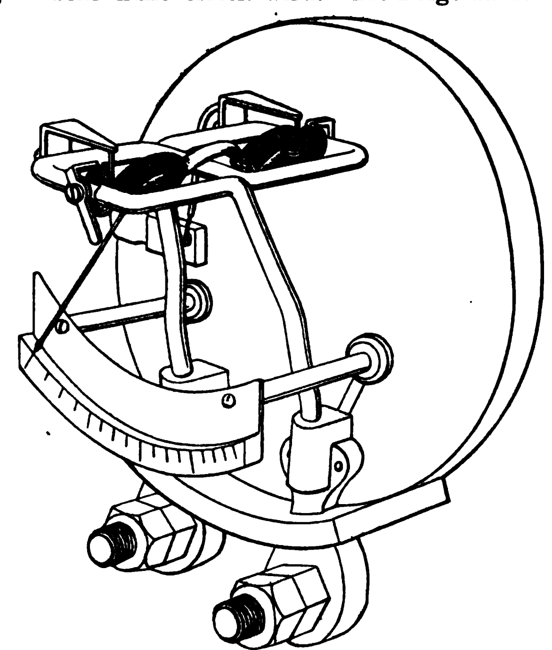


Fig. 220. Arbeitszeiger von W. Thomson.

Instrumente stets richtig zeigen, ganz einerlei, ob Gleichstrom oder gewöhnlicher Wechselstrom sie durchfliesst, und ob und welche Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung in dem betreffenden Wechselstromkreise herrscht. Auch die Form der Wechselstromkurven ist von fast verschwindendem Einflusse auf die Angaben des Arbeitszeigers.

10. Arbeitszeiger von W. Thomson.

Dieser Apparat ist ein einfach konstruiertes Dynamometer, dessen feste Spule aus zwei aus dickem Kupferdraht gebogenen, neben einander liegenden Rechtecken besteht. (Vergl. Fig. 220.) Unter

Zwischenlagerungen von Isolationsmaterial sind an dieses Rechteck zwei Haken aus Phosphorbronze befestigt, die zum Tragen der im Nebenschluss liegenden beweglichen Spulen bestimmt sind. Um das Instrument gegen die Einwirkung benachbarter Magnetfelder unempfindlich zu machen, besteht die Spannungsspule aus zwei Ringen, in denen der schwache, der Spannung proportionale Strom in entgegengesetzter Richtung verläuft. Diese beiden Ringe bilden also ein astatisches System. Die beiden vorher erwähnten Haken dienen als Unterstützung für die Achse der beweglichen Spule.

Auf der einen Seite wird die Achse durch eine ringförmige Schneide, auf der anderen Seite durch eine gerade Schneide gebildet. Die Zu- und Abführung des schwachen Stromes zu den beweglichen

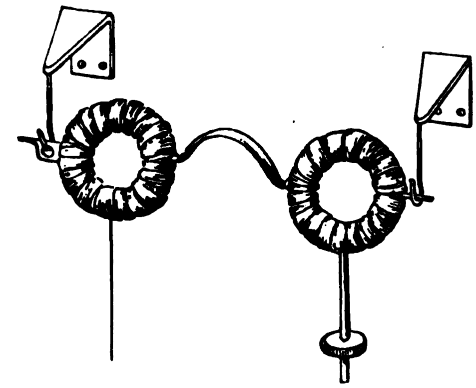


Fig. 221. Die beweglichen Spulen des W. Thomson'schen Arbeitszeigers.

Spulen wird durch zwei flache Spiralfedern aus Palladium bewirkt, die in Fig. 220 zu sehen sind.

Um in dem Nebenschluss nur einen schwachen, der Spannung proportionalen Strom von etwa $\frac{1}{4}$ Ampère zustande kommen zu lassen, ist auf der Grundplatte ein gutventilierter, induktionsfreier Vorschaltwiderstand angeordnet, dessen Grösse sich nach der Höhe der Spannung richtet.

Die eine ringförmige Spule des beweglichen astatischen Systems trägt einen Zeiger, der vor einer Skala spielt; an der anderen Spule ist ein regelbares Gegengewicht angeordnet, das der zwischen den festen und beweglichen Spulen wirksamen elektrodynamischen Anziehungskraft in den verschiedenen Stellungen das Gleichgewicht hält. (Man vergleiche die Fig. 221, in der die bewegliche Spule und ihre Aufhängung besonders dargestellt sind.) Die empirisch geteilte Skala giebt unmittelbar, je nach dem Messbereiche des Instrumentes, Watt, Hektowatt oder Kilowatt an.

Die Schaltung erfolgt in derselben Weise, wie dies in Fig. 218, Seite 306, für das Wattmeter von Siemens & Halske angegeben worden ist.

Damit der Zeiger sich möglichst ohne Schwankungen einstellt, ist es ratsam, an dem beweglichen Systeme noch eine Dämpfung anzubringen.

Bei dem

11. Wattzeiger von Hartmann & Braun,

der in seiner äusseren Erscheinung in Fig. 222 dargestellt ist, wird diese Dämpfung z. B. dadurch bewirkt, dass an der Achse des beweglichen Systems eine Aluminiumscheibe befestigt ist, die sich



Fig. 222. Wattzeiger von Hartmann & Braun.

zwischen einem starken permanenten Magneten und einer davor aufgestellten weichen Eisenplatte bewegt.

Die weiche Eisenplatte übt gleichzeitig eine magnetische Schirmwirkung aus, sodass die aus dem Magneten austretenden Kraftlinien das bewegliche System nicht beeinflussen können.

12. Arbeitsmessung bei Drehstrom.

Auch die in einem Drehstromnetze verbrauchte Arbeit lässt sich mit Hilfe der Wattmeter messen. Diese Arbeit lässt sich in zwei einfache Wechselstromarbeiten zerlegen, die mit Hilfe des Elektrodynamometers einzeln gemessen werden können.

Wir bezeichnen (Fig. 223) mit a, b, c die drei Zuleitungen, mit 1, 2, 3 die drei Zweige des Arbeitskreises; dem entsprechend seien i_a, i_b, i_c die Momentanwerte der Stromstärken in den Zuleitungen,

e_a, e_b, e_c die Momentanwerte der Spannungen zwischen je zwei Leitungen bc, ca, ab und ebenso i_1, i_2, i_3, e_1, e_2, e_3 die Momentanwerte der Ströme in den drei Zweigen des Arbeitskreises und der Klemmenspannungen zwischen den Enden derselben.

Der Momentanwert des Arbeitsverbrauches im ganzen Nutzstromkreise besitzt den Wert:

$$a = e_1 \cdot i_1 + e_2 \cdot i_2 + e_3 \cdot i_3 \quad \ldots \ldots \quad 20)$$

Für den Fall, dass die drei Zweige des Arbeitskreises in Sternschaltung angeordnet sind (siehe Fig. 223), ergeben sich folgende Beziehungen zwischen den Spannungen und Stromstärken:

$$e_1 - e_2 = e_c; \quad e_2 - e_3 = e_a; \quad e_3 - e_1 = e_b \quad . \; . \quad 21)$$

$$i_1 = i_a; \quad i_2 = i_b; \quad i_3 = i_c \quad \ldots \ldots \quad 22)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0; \quad i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad \ldots \; . \quad 23)$$

Durch Multiplikation der letzten Gleichung mit e_1 und Subtraktion von der für die Arbeit a aufgestellten Gleichung 20) folgt:

$$a = i_2 \cdot (e_2 - e_1) + i_3 \cdot (e_3 - e_1); \quad \ldots \; . \quad 24)$$

also mit Rücksicht auf die Gleichungen 21 und 22:

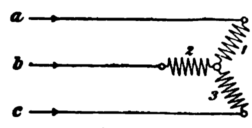


Fig. 223.
Sternschaltung bei Drehstrom.

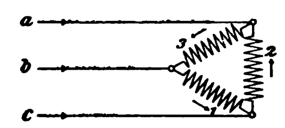


Fig. 224.
Dreieckschaltung bei Drehstrom.

$$a = e_b \cdot i_c - e_c \cdot i_b \quad \ldots \ldots \ldots \quad 25)$$

Für Dreieckschaltung bestehen dagegen (siehe Fig. 224) die Gleichungen:

$$i_2 - i_1 = i_c; \quad i_3 - i_2 = i_a; \quad i_1 - i_3 = i_b \quad . \; . \quad 26)$$

$$e_1 = e_a; \quad e_2 = e_b; \quad e_3 = e_c \quad \ldots \; . \quad 27)$$

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 28)$$

Durch Multiplikation der letzten Gleichung mit i_1 und Subtraktion von der für die Arbeit a geltenden Gleichung 20) ergiebt sich:

$$a = e_2 \cdot (i_2 - i_1) + e_3 \cdot (i_3 - i_1),$$

oder mit Rücksicht auf die Gleichungen 26) und 27):

$$a = e_b \cdot i_c - e_c \cdot i_b \quad \ldots \ldots \ldots \quad 29)$$

Es lässt sich demnach in beiden Fällen die in dem Drehstromnetz verbrauchte Arbeit A aus zwei einfachen Wechselstromarbeiten A_1 und A_2 nach der Gleichung

$$A = A_1 - A_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 30)$$

zusammensetzen, deren beide Teile mit Hilfe des Elektrodynamometers nach der früher gegebenen Anweisung bestimmt werden können.

Zur Messung der Arbeit A_1 hat man demzufolge die Stromspule des Elektrodynamometers in die Leitung c, die Spannungsspule nebst Vorschaltwiderstand zwischen die Leitungen c und a zu schalten, während man die Arbeit A_2 durch Einschalten der Stromspule in die Leitung b und der Spannungsspule nebst Vorschaltwiderstand zwischen a und b erhält. Um beide Messungen bequem nach einander ausführen zu können, verwendet man einen Umschalter mit sechs Quecksilbernäpfen, der durch Einlegen von Metall-

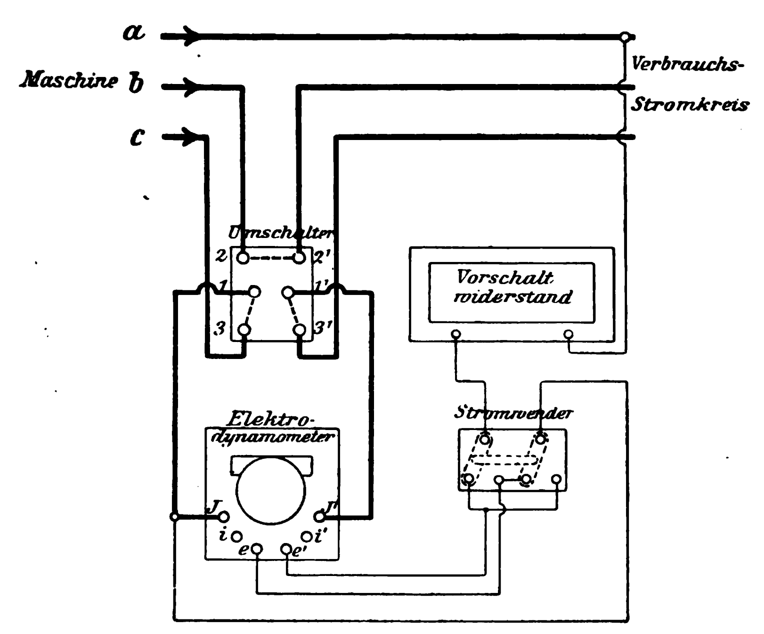


Fig. 225. Schaltung des Wattmeters für Arbeitsmessungen bei Drehstrom.

bügeln in die Näpfe ein Umtauschen der Leitungen b und c gestattet, und einen Stromwender, durch den die Stromrichtung in der beweglichen Spule des Elektrodynamometers umgeschaltet werden kann, wenn der Zeigerausschlag in der falschen Richtung erfolgt. Nachdem man die in dem Schaltungsschema (Fig. 225) angegebenen Drahtverbindungen ausgeführt hat, legt man zunächst einen Metallbügel zwischen die Näpfe 2 und 2′ des Umschalters und verbindet die Näpfe 3 mit 1 und 3′ mit 1′ durch zwei Bügel, die an einer isolierenden Platte in geeignetem Abstande von einander befestigt sind. Man liest sodann am Elektrodynamometer den Torsionswinkel

α_1 ab, der die Teilarbeit A_1 angiebt. Sodann legt man, um den Strom nicht zu unterbrechen, zunächst einen Metallbügel zwischen die Näpfe 3 und 3′, hebt die beiden die Näpfe 3 und 1 sowie 3′ und 1′ verbindenden Bügel empor und legt sie zwischen die Näpfe 2 und 1 und 2′ und 1′; zuletzt entfernt man den die Näpfe 2 und 2′ verbindenden Bügel. Die Ablesung des Torsionswinkels α_2 am Elektrodynamometer ergiebt die Teilarbeit A_2. Ob beide Teilarbeiten dasselbe oder entgegengesetzte Vorzeichen besitzen, unterscheidet der Gebrauch des Stromwenders. Muss zur Ausführung der zweiten Messung der Stromwender umgelegt werden, so stimmt die Richtung des durch die bewegliche Spule fliessenden Stromes mit der in den Formeln festgesetzten Positivrichtung der Spannungen überein; die Differenz der beiden Teilarbeiten ergiebt also die Gesamtarbeit A. Braucht dagegen der Stromwender zur Ausführung der zweiten Messung nicht umgelegt zu werden, so sind die beiden Teilarbeiten zu addieren.

Unter der Annahme, dass die Ströme nach dem Sinusgesetz verlaufen, ergeben sich für die beiden Teilarbeiten die Ausdrücke:

$$A_1 = E_b \cdot J_c \cdot \cos \chi_1 \quad \ldots \ldots \quad 31)$$

und

$$A_2 = E_c \cdot J_b \cdot \cos \chi_2 \quad \ldots \ldots \quad 32)$$

wo unter E_b, E_c, J_b, J_c die effektiven Werte der Spannungen und Stromstärken, und χ_1 die Phasenverschiebung des Stromes i_c gegen die Spannung e_b und unter χ_2 die Phasenverschiebung zwischen Strom i_b und Spannung e_c zu verstehen sind. Zur Bestimmung der Korrektionsfaktoren F_1 und F_2, mit denen die aus den Ablesungen α_1 und α_2 des Torsionswinkels sich ergebenden Teilarbeiten:

$$A_1 = C \cdot \alpha_1 \cdot (W + w) \quad \ldots \ldots \quad 33)$$

und

$$A_2 = C \cdot \alpha_2 \cdot (W + w) \quad \ldots \ldots \quad 34)$$

wegen der Selbstinduktion der beweglichen Spule des Elektrodynamometers multipliziert werden müssen, hat man ebenso wie bei der Messung einfacher Wechselstromarbeiten die effektiven Stromstärken J_b und J_c in den Leitungen b und c und die effektiven Spannungen E_b und E_c zwischen den Leitungen c und a und den Leitungen a und b mit einem besonderen Stromelektrodynamometer und einem astatischen Spannungselektrodynamometer einzeln zu messen. Nach den Gleichungen:

$$\cos(\chi_1 - \varphi) = \frac{C \cdot \alpha_1 \cdot (W + w)}{E_b \cdot J_c \cdot \cos \varphi} \quad \ldots \quad 35)$$

$$\cos(\chi_2 - \varphi) = \frac{C \cdot \alpha_2 \cdot (W + w)}{E_c \cdot J_b \cdot \cos \varphi} \quad \ldots \quad 36)$$

hat man dann die Winkel χ_1 und χ_2 zu berechnen. Es ergeben sich für die Korrektionsfaktoren die Werte:

$$F_1 = \frac{\cos \chi_1}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi_1 - \varphi)} \quad \ldots\ldots \quad 37)$$

und

$$F_2 = \frac{\cos \chi_2}{\cos \varphi \cdot \cos (\chi_2 - \varphi)} \quad \ldots\ldots \quad 38)$$

Auch bei Drehstrommessungen wird jedoch die Bestimmung dieser Korrektionsfaktoren nur in den seltensten Fällen erforderlich sein, und es werden fast immer die direkt aus den Torsionswinkeln bestimmten Arbeitswerte als ausreichend genau angenommen werden können.

Da meistens die Annahme berechtigt ist, dass die drei Zweige des Drehstromnetzes annähernd gleich belastet sind, so ergiebt sich die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung des Arbeitskreises aus der Gleichung:

$$\cos \chi = \frac{A}{J \cdot E \cdot \sqrt{3}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 39)$$

wobei für J der Mittelwert aus den beobachteten Stromstärken J_b und J_c, und für E der Mittelwert aus den beiden gemessenen Spannungen E_b und E_c genommen wird.

Sind die drei Zweige des Arbeitskreises sehr ungleich belastet, so empfiehlt es sich, die Messung der Arbeit, Stromstärke und Spannung nach der für die Messung einfacher Wechselströme (Abschnitt 8) angegebenen Weise für jeden Zweig besonders vorzunehmen und aus den Ergebnissen der Messung die Phasenverschiebung in jedem Zweige einzeln zu berechnen.

Die in Abschnitt 9, 10 und 11 beschriebenen Arbeitszeiger können in derselben Ausführung ihrer Wickelung, wie sie für Gleich- und gewöhnlichen Wechselstrom angewendet wird, auch für Drehstrom benutzt werden. Sie erhalten nur in diesem Falle einen besonderen, in drei Abteilungen gewickelten Vorschaltwiderstand. Richtige Angaben bei Drehstrom können von ihnen nur dann erwartet werden, wenn alle drei Zweige des Netzes, an das sie angeschlossen sind, gleich belastet sind.

Der den Drehstrom-Arbeitszeigern beigegebene Vorschaltwiderstand besitzt drei Abteilungen, von denen zwei gleichen Widerstand haben, während der Widerstand der dritten gleich einem dieser beiden Widerstände abzüglich des Widerstandes der beweglichen Spule des Arbeitszeigers ist. Für das Instrument gilt wieder die Gleichung:

$$J \cdot i = C \cdot a.$$

Für i können wir setzen

$$i = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot R},$$

wenn wir mit E die zwischen zwei Leitern herrschende Spannung und mit R einen der drei einander gleichen Widerstände bezeichnen. Also

$$J \cdot \frac{E}{\sqrt{3} \cdot R} = C \cdot a.$$

Die Drehstromarbeit A ist aber $= J \cdot E \cdot \sqrt{3}$, also

$$A = J \cdot E \cdot \sqrt{3} = 3 \cdot R \cdot C \cdot a. \quad \ldots\ldots \quad 40)$$

13. Messung des Phasenunterschiedes.

Während bei dem Gleichstrom nur zwei charakteristische Grössen in Betracht zu ziehen sind, Strom und Spannung, deren Produkt die geleistete Arbeit bestimmt, so kommt bei dem Wechselstrome noch eine dritte Grösse, der Phasenunterschied zwischen dem Strome und der Spannung hinzu, denn die Arbeit eines Wechselstromes ist das Produkt aus Strom, Spannung und dem Cosinus des Phasenunterschiedes zwischen beiden.

In einer Gleichstromanlage genügen somit für jeden Stromerzeuger zwei Instrumente, um den Betrieb übersehen zu können, ein Ampèremeter und ein Voltmeter; bei einer Wechselstromeinrichtung sind hingegen drei Instrumente erforderlich. Ausser dem Stromzeiger und Spannungszeiger muss es noch eine Vorrichtung geben, entweder einen Arbeitsmesser, oder ein Instrument, an dem der Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung abgelesen werden kann. Apparate, die eine Messung des Phasenunterschiedes gestatten, nennt man Phasenmeter. Welche drei Instrumente man wählt, ist ziemlich gleichgültig. Der Gebrauch des Phasenmessers bietet jedoch den Vorteil dar, dass man sofort erkennt, ob der Strom der Spannung vorauseilt, also eine positive Phasenverschiebung vorhanden ist, wie dies der Fall sein wird, wenn eine im Stromkreise wirksame Kapazität überwiegt, oder ob der Strom gegen die Spannung verzögert, demnach der Phasenunterschied negativ ist, was dann stattfindet, wenn die im Stromkreise vorhandene Selbstinduktion überwiegt.

Der Chef-Elektriker der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, von Dolivo-Dobrowolski, hat im Jahre 1894 nach dem Prinzipe der Drehstrommotoren eine Vorrichtung konstruiert, die Grösse und Sinn des Phasenunterschiedes zu messen gestattet, und die er

nennt.

Um eine Eisenscheibe (vergl. Fig. 226), die um eine Achse drehbar ist, sind zwei Wickelungen gelegt, so dass sich in diesen Spulen die Scheibe frei bewegen kann. Die eine dieser Spulen besteht aus wenigen Windungen dicken Drahtes, der vom Hauptstrome durchflossen wird. Unter 90° dagegen geneigt, ist eine zweite Spule angebracht, die aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes besteht. Ausserdem ist dieser Spule noch ein grosser induktionsfreier Widerstand vorgeschaltet. Der schwache, in dieser Spule fliessende Strom

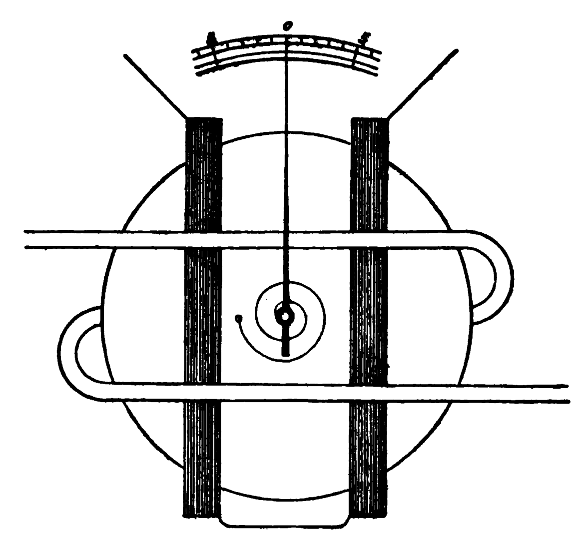


Fig. 226. Phasenmesser der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

ist alsdann mit der Spannung des Wechselstromes nahezu in gleicher Phase und der Spannung proportional. Diese beiden um 90° gegen einander geneigten Spulen üben alsdann ein Drehungsmoment D auf die Eisenscheibe aus, das die Grösse

$$D = C \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin\varphi \quad \ldots \ldots \quad 41)$$

hat, wenn J die Stromstärke in der dickdrähtigen Stromspule, i_2 die Stromstärke in der dünndrähtigen Spannungsspule und φ der Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung ist. C ist eine von den Abmessungen der Teile des Instrumentes abhängige Konstante.

Der Drehung der Scheibe entgegen wirkt die Elastizität einer Torsionsfeder. Die Scheibe wird daher unter der Einwirkung der beiden in der Phase gegen einander verschobenen Ströme nicht in dauernde Rotation geraten, sondern nur um einen Winkel ge-

dreht werden, der dem Betrage des Drehungsmomentes D proportional ist.

Wenn der Widerstand der Spannungsspule und ihres induktionsfreien Vorschaltwiderstandes genügend gross ist, so ist der diese Spule durchfliessende Strom i_2 der Spannung E proportional. Da nun in einer vorhandenen Anlage während des Betriebes die Spannung E möglichst konstant erhalten wird, so ist:

$$D = K \cdot J \cdot \sin \varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 42)$$

wo K eine neue Konstante ist.

Das Produkt $J \cdot \sin \varphi$ ist aber, wie das Diagramm (Fig. 227) zeigt, der Leerstrom oder die wattlose Komponente des Stromes.

Das Drehungsmoment, das auf die Eisenscheibe ausgeübt wird, ist somit der auf der Spannung senkrechten Komponente des Stromes direkt proportional.

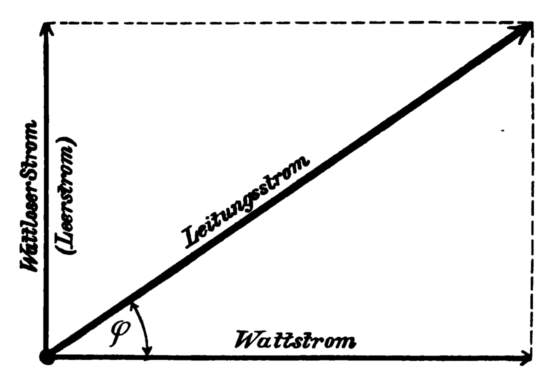


Fig. 227. Zerlegung des Leitungsstromes in die Arbeitskomponente und die wattlose Komponente.

Mit der Scheibe wird ein Zeiger fest verbunden, der vor einer Skala spielt. An dieser Skala kann man den Betrag des Leerstromes direkt in Ampère ablesen.

Selbstverständlich muss für jede Wechselzahl, Spannung und Form der Stromkurve die Skala neu empirisch geteilt werden.

Da die Angaben des Instrumentes der Spannung proportional sind, kann eine für eine bestimmte Spannung hergestellte Teilung auch für eine andere Spannung benutzt werden, wenn man die Ausschläge mit dem Verhältnisse der Spannungen multipliziert.

Die Bestimmung des Phasenunterschiedes ist besonders dann von Wichtigkeit, wenn mehrere Maschinen auf dasselbe Verteilungsnetz in Parallelschaltung arbeiten oder sogenannte Synchronmotoren für Arbeitsübertragung auf elektrischem Wege durch Wechsel- oder Drehstrom Verwendung finden sollen.

Bei parallel geschalteten Wechsel- oder Drehstrommaschinen wird die Leistung nur durch die Menge der von der Betriebsdampfmaschine oder von der Turbine an die Riemenscheibe der elektrischen Maschine abgegebenen Arbeit geregelt. Ist z. B. diese Maschine zu schwach erregt, giebt sie zu niedrige Spannung, so fliesst von den anderen Maschinen ein wattloser Ausgleichsstrom dem Anker dieser Maschine zu, der durch seine Rückwirkung auf das Feld die Spannung auf die erforderliche Höhe bringt. Je nachdem dieser wattlose Strom in seiner Phase um 90° vor der Spannung vorauseilt oder um diesen Winkel hinter ihr zurückbleibt, wird das Feld der betreffenden Maschine durch die Ankerrückwirkung verstärkt oder geschwächt. Dieser Korrektionsstrom wird durch das Phasenmeter gemessen, er bewirkt das, was man früher, ehe man den richtigen Zusammenhang

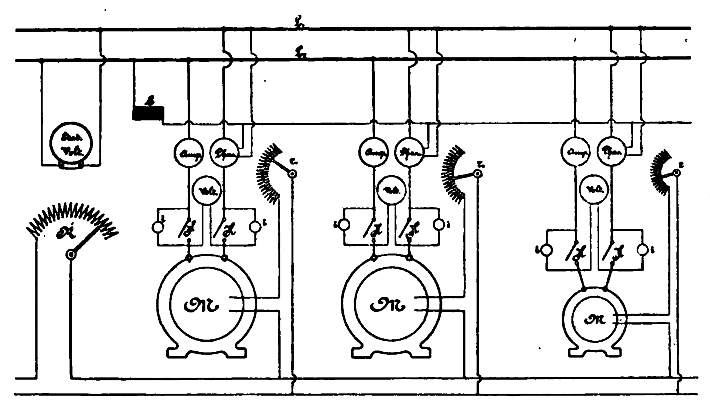


Fig. 228. Gebrauch der Phasenmesser in Anlagen mit parallel geschalteten Wechselstrommaschinen.

kannte, die synchronisierende Tendenz parallel geschalteter Wechselstrommaschinen nannte.

Ein solcher wattloser Strom belastet nun aber die Ankerdrähte unnütz und erschwert die Übersicht über die Verteilung der Leistungen auf die einzelnen in Parallelschaltung arbeitenden Maschinen.

Zeigt das Phasenmeter einer Anlage merklich verschiedene Ablenkung, so wird man die Erregung der Wechselstrommaschinen in dem Sinne ändern, dass Unterschiede in den Angaben der Phasenmesser wegfallen.

Ist die Belastung im Verteilungsnetze wesentlich induktionsfrei, so müssen alle Phasenmeter auf Null stehen oder um Null herum pendeln.

Besteht jedoch die Belastung aus Motoren oder Bogenlampen, ist also im äusseren Widerstande merkliche Selbstinduktion vorhanden,

so müssen alle Phasenmeter einen der Stromstärke der betreffenden Maschine proportionalen Ausschlag nach derselben Seite zeigen.

Bei Benutzung von Phasenmessern kann man es durch Änderung der Erregerstromstärke leicht dahin bringen, dass zwischen den parallel geschalteten Maschinen keine Ausgleichsströme fliessen.

Die Summe der Ablesungen an den Ampèremetern der einzelnen Maschinen zeigt dann den Stromverbrauch im Netze an.

Die nebenstehende Skizze (Fig. 228) stellt die Verbindung parallel geschalteter Wechselstrommaschinen M, M, M mit den Sammelschienen L_1 L_2, mit den je drei Messinstrumenten jeder Maschine: Ampèremeter,[1]) Voltmeter, Phasenmesser, und mit den Regulierwiderständen r, r, r und R für den Erregerstrom dar.

H H sind die Hauptausschalter jeder Maschine, i i sind die sogenannten Phasenlampen, von denen wir späterhin (S. 235) reden werden. Ausserdem ist noch ein Stationsvoltmeter und für die Spannungsspulen der Phasenmesser ein gemeinsamer Vorschaltwiderstand s vorgesehen.

Um auch bei dem Auftreten starker Selbstinduktion in dem Verteilungsnetze alle Phasenmesser gleichzeitig auf Null bringen zu können, empfiehlt es sich, die Vorschaltspule s so einzurichten, dass man ihr einen einstellbaren Betrag von Selbstinduktion geben kann.

14. Die Bestimmung der Formen der Kurven der Wechselströme.

Für eine grosse Zahl von Aufgaben der Wechselstromtechnik ist es von Wichtigkeit, die Form der Kurven zu kennen, durch die der zeitliche Verlauf der Ströme und Spannungen graphisch dargestellt wird; besonders häufig hat man das Bedürfnis, die Abweichungen von der Gestalt der Sinoide, sowie das Auftreten stärkerer Nebenwellen mit höheren Wechselzahlen kennen zu lernen.

Es giebt zwei Gruppen von Methoden zur Feststellung der Form der Schwingungskurve des Wechselstromes, die optischen Methoden, durch welche die Gestalt der Kurve mit einem Male sichtbar gemacht wird, und die Methode der successiven Kontakte an verschiedenen Stellen der Kurve, durch welche eine grössere Zahl von Punkten auf der Kurve bestimmt wird.

Von der ersten Gruppe beschreiben wir

a) die optische Methode von Oskar Frölich.

Dieselbe benutzt die aus den Grundlagen des Fernsprechwesens bekannte Thatsache, dass eine Telephonmembran die Eigenschaft besitzt,

---

[1]) Um die Belastung der einzelnen Maschinen leicht übersehen zu können, empfiehlt es sich, das Ampèremeter durch ein Wattmeter zu ersetzen.

sich fast vollständig mit ihren Schwingungen dem zeitlichen Verlauf rasch wechselnder Ströme anzupassen, ohne durch Eigenschwingungen die Gestalt der Kurven erheblich zu verändern.

Man sendet daher durch einige Windungen, die sich hinter der Membran eines Telephons befinden, den zu untersuchenden Wechselstrom oder einen Bruchteil desselben und macht die Schwingungen der Telephonmembran sichtbar.

Um diesen Zweck zu erreichen, befestigt Frölich zwischen der Mitte der Membran und deren Rand einen kleinen Spiegel, lässt auf diesen Spiegel den kräftigen Lichtstrahl eines Projektionsapparates fallen und zerlegt die Schwingungen durch einen rotierenden Spiegel.

Fig. 229 zeigt die Anordnung des Apparates.

Das Licht einer Gleichstrombogenlampe B wird durch eine Kondenserlinse L konzentriert und auf die feine punktförmige Öffnung o eines Schirmes geworfen. Von dieser hell erleuchteten Öffnung o entwirft die Projektionslinse l auf dem Strahlenwege l s R S ein reelles Bild auf dem Schirm oder der photographischen Platte S.

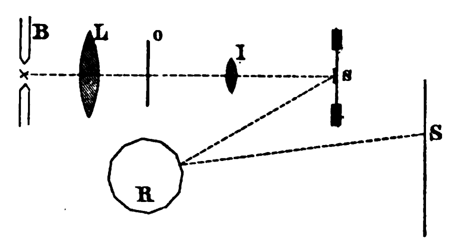


Fig. 229. Anordnung des Frölich'schen Apparates zur Bestimmung der Kurvenform der Wechselströme.

Der Spiegel s ist auf der Telephonmembran aufgekittet. R ist ein sehr genau gearbeitetes Spiegelpolygon, das durch einen von dem zu messenden Wechselstrom betriebenen kleinen Synchronmotor in rasche Umdrehungen versetzt wird. Die Schwingungen der Telephonmembran und die Umdrehungen des rotierenden Spiegels stehen somit in einem Verhältnis zu einander, das durch eine ganze Zahl ausgedrückt wird. Ist z. B. die Zahl der Spiegelplatten des Polygonspiegels gleich der halben Polzahl des Synchronmotors, so erscheint auf dem Schirm S jede Phase jeder Schwingung immer genau an derselben Stelle. Man erhält daher ein ruhig stehendes Bild der Schwingungskurve, welches entweder unmittelbar beobachtet oder durch eine photographische Platte aufgenommen werden kann. Für das Gelingen des Versuches ist es von besonderer Bedeutung, dass die Ebenen der Polygonspiegel genau der Drehachse parallel sind und unter einander genau gleiche Winkel einschliessen. Dies lässt sich aber leicht erreichen, wenn die Spiegel mit dem prismatischen Körper, der sie trägt, durch je drei Stellschrauben verbunden werden.

Die nachfolgenden Figuren sind Abbildungen der Kurven von Wechselstrommaschinen. Fig. 230 bezieht sich auf eine kleine Wechselstrommaschine älterer Konstruktion mit Scheibenanker von



Fig. 230. Stromkurve einer kleinen Wechselstrommaschine ohne Eisen im Anker.

Siemens & Halske, ohne Eisen im Anker. Fig. 231 zeigt die Stromkurve derselben Maschine mit Eisen im Anker. Man erkennt sofort,



Fig. 231. Stromkurve einer kleinen Wechselstrommaschine mit Eisen im Anker.

dass im zweiten Falle der Charakter der reinen Sinoide durch das Hinzutreten einer zweiten Welle von doppelter Periodenzahl und



Fig. 232. Wechselstromkurve vor einem Kabel.

kleinerer Amplitude verändert wird.

Ganz besonders wertvoll aber erscheint der Umstand, dass man



Fig. 233. Wechselstromkurve nach Einschaltung eines Kabels.

nach dieser Methode auch Phasenverschiebungen bei elektrischen Vorgängen beobachtbar machen und messen kann.

Um dieselben zur Erscheinung zu bringen, bringt man vor den Schirm oder vor die Kassette, in der sich die photographische Platte

befindet, einen vertikalen Draht. Man stellt z. B. die Marke genau auf die Kuppe des Wellenberges ein und schaltet dann in den Stromkreis die Vorrichtungen ein, die eine Phasenänderung hervorrufen.

So zeigt z. B. Fig. 232 die Stromkurve eines Wechselstromes, ehe er in ein Kabel eintritt, und dabei ist die Marke auf die Höhe des Wellenberges eingestellt; die daneben stehende Kurve (Fig. 233) zeigt denselben Strom hinter dem Kabel. Die Phasendifferenz beträgt etwa 64°, auch hat die Amplitude des Wechselstromes merklich abgenommen.

Vielfach ist dieser äusserst fruchtbaren Methode der Vorwurf gemacht worden, dass sie mehr für das Laboratorium, als für die Praxis geeignet sei. Thatsächlich ist dieselbe jedoch auch in den Messzimmern verschiedener Wechsel- und Drehstromcentralen mit bestem Erfolge in Anwendung.

Mit ausserordentlich einfachen Hilfsmitteln, wie sie sich in jeder Wechselstromanlage beschaffen lassen, kann die punktweise Aufnahme der Wechselstromkurven nach der

b) Methode von Drexler mit Abänderungen von Behn-Eschenburg

erfolgen.

Dieselbe beruht auf dem von Joubert herrührenden Gedanken, dass man auf der Welle der zu untersuchenden Maschine und auf einer mit einem geringeren Tourenunterschied laufenden Welle zwei Schneiden anbringt, die, wenn sie aneinander vorüber gehen, eine Verbindung nach einem Galvanometer oder einem Spannungsmesser oder nach den Belegen eines Kondensators herstellen, der sich dann durch das Galvanometer entladet. Nehmen wir an, der Unterschied der Umlaufszahlen der beiden Wellen betrage 10 in einer Minute, und das erste Mal ständen sich die Kontaktvorrichtungen gegenüber, wenn gerade die Stromwelle durch Null hindurchgeht. Nunmehr wird die eine Schneide während der weiteren Drehung mehr und mehr zurückbleiben. Nach sechs Sekunden werden sich dann die Schneiden wieder gegenüberstehen, aber in einer Lage, die um $\frac{1}{10}$ einer Umdrehung gegen die vorige zurück ist. Wir erhalten also jetzt die Spannung bei einer Lage des Ankers, die um 36° gegen die vorige verschieden ist. Nach abermals derselben Zeit erhalten wir die Spannung für eine um abermals $\frac{1}{10}$ Umdrehung verschobene Stellung des Ankers u. s. f.

Es leuchtet ein, dass, wenn man nur den Tourenunterschied der beiden Wellen, die beide Teile der Kontaktvorrichtung tragen, genügend klein macht, der Dauer der Periode für den Ausschlag des Voltmeters eine beliebige Grösse gegeben werden kann. Laufen beide Wellen synchron, so würde diese Periode unendlich gross werden.

Man wählt die Periode so gross, dass einerseits die Schwingungsdauer des Voltmeters oder Galvanometers ohne Belang wird, und anderseits der Beobachter genügend Zeit hat, in beliebig vielen Punkten der Periode den Stand der Nadel sicher anzugeben.

Man verfährt zur praktischen Durchführung des Versuches folgendermassen: Irgend eine drehbare Scheibe (z. B. die Riemenscheibe einer leer gehenden Dynamomaschine), die an einer Stelle ihres Umfanges mit einer Schleifbürste Kontakt macht, wird mittels Riemen direkt von der Riemenscheibe des Wechselstromerzeugers oder eines Synchronmotors derart angetrieben, dass ihre Umlaufszahl sich zu derjenigen des Stromerzeugers sehr nahe verhält wie die Polzahl des Stromerzeugers oder Motors zu einer geraden Zahl. Der Unterschied zwischen der Umlaufszahl der Scheibe und der des mit der Periodenzahl des Wechselstromes rotierenden Motors darf aber nur sehr gering sein. Diesen geringen Geschwindigkeitsunterschied erreicht man leicht dadurch, dass man die treibende und angetriebene Riemenscheibe möglichst gleich gross wählt und kleine Unterschiede des Durchmessers durch Aufkleben von Papierstreifen herstellt. Auf die angetriebene Riemenscheibe wird eine hölzerne Scheibe mit einer Kontaktstelle befestigt und auf dem Rand dieser Scheibe gleitet eine Kontaktfeder. Zwischen diese Feder und einen der beiden Punkte, deren Spannungsdifferenz gemessen werden soll, wird das zur Messung dienende Galvanometer oder Voltmeter geschaltet.[1]) Der rotierende Scheibenkontakt wird etwa durch einen Schleifring mit Feder mit dem anderen der beiden Punkte verbunden, deren Spannungsunterschied bestimmt werden soll.

Bei einer Anlage mit 50 Perioden wurden z. B. zwei Riemenscheiben von 120 *mm* Durchmesser verwendet und die Schlüpfung derselben durch Aufkleben von Papierstreifen auf 0,00016 gebracht. Dadurch wurde die Periode des Galvanometerausschlages auf zwei Minuten gebracht. Dies ist Zeit genug, um 40 Beobachtungspunkte während einer solchen Periode von zwei Minuten aufzunehmen. Der Voltmeterausschlag verlief sehr ruhig und sehr nahe proportional den Momentanwerten der Spannung. Dieses Verfahren kann selbstverständlich auch leicht zu einem registrierenden umgewandelt werden.

Drexler[2]) z. B. liess von dem beweglichen Zeiger des Galvanometers die Induktionsfunken eines Ruhmkorff'schen Induktionsapparates mit sehr hoher Unterbrecherzahl auf ein photographisches

---

[1]) Bei einer Anlage mit 100 Volt Spannung z. B. ein Weston'sches Millivoltmeter mit 500 Ohm induktionsfreiem Vorschaltwiderstand.

[2]) Man vergleiche die Beschreibung des Drexler'schen Apparates. ETZ 1896, S. 378.

Papier überspringen, das senkrecht zur Bewegungsrichtung des Zeigers von einem Uhrwerk gleichförmig verschoben wurde.

Er verwendete einen von dem zu messenden Generator gespeisten asynchronen Wechselstrommotor, dessen Tourenzahl sich, weil der Motor unbelastet war, dem Synchronismus ausserordentlich näherte. Die Kontaktfeder kann dann ebenfalls feststehen, und es fällt in jede volle Periode ein Kontakt, und zwar ist der zeitliche Abstand zweier Kontaktgebungen stets etwas kleiner als eine Periode.

Diese Stromschlüsse benutzte er direkt zur Speisung eines eisenfreien Galvanometers, System Deprez - d'Arsonval, mit möglichst starker Ablenkungskraft. Fig. 234 zeigt die Anordnung des Drexlerschen Apparates. A und B sind die beiden Punkte, zwischen denen die Spannungskurve gemessen werden soll. C ist die Achse des Motors mit der Kontaktvorrichtung, G das Galvanometer, dessen Feld durch zwei von Gleichstrom durchflossene Spulen gebildet wird. Z ist der am beweglichen Rahmen des Galvanometers befestigte Zeiger, S die Unterlage für das lichtempfindliche Papier, J der Induktionsapparat, der die von Z nach S überspringenden Induktionsfunken liefert.

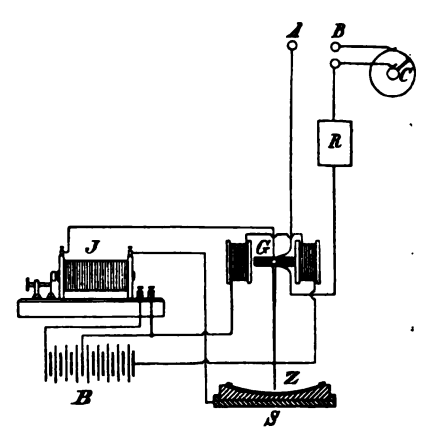


Fig. 234. Drexlers Apparat zur Aufzeichnung der Stromkurven.

Die Batterie B speist mit ihrem linken Teile die Primärspule des Induktionsapparates; mit ihrem rechten Teile liefert sie den Strom für die das Magnetfeld des Galvanometers erzeugenden Spulen. R ist ein induktionsfreier Vorschaltwiderstand.

Fig. 235 zeigt eine der mit Drexlers Apparat aufgenommenen Wechselstromkurven.

15. Die Messung des Selbstinduktionskoëffizienten.

In fast allen Formeln und Rechnungen kommen die Selbstinduktionskoëffizienten von Wechselstromapparaten vor, und zwar meist in der Form $2\pi\sim L$, wo $\sim$ die Zahl der Perioden in 1 Sekunde und L den Selbstinduktionskoëffizienten bedeutet. Die Mitteilungen über Messungen an Wechselströmen würden daher unvollständig bleiben, wenn nicht der Weg zur Bestimmung dieser wichtigen Grössen angegeben würde.

Die Bestimmung der Zahl der Perioden $\sim$ bietet keine Schwierigkeit dar. Versteht man unter U die Zahl der Umläufe des Stromerzeugers in 1 Minute und mit p die Anzahl der Polpaare der Feldmagneten, so ist:

$$\sim = \frac{U \cdot p}{60} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 43)$$

Grössere Schwierigkeiten bietet die Ermittelung des Selbstinduktionskoëffizienten L, da der in Kap. IV, Abschn. 13., S. 102, angegebene Weg nicht immer benutzbar ist. Eine einfache und bequeme, besonders auch bei grösseren Wechselstromapparaten leicht verwendbare Methode giebt es zur Zeit noch nicht.

Bei der Messung von Induktionskoëffizienten handelt es sich, da der Induktionskoëffizient im elektromagnetischen Masssystem die Dimension einer Länge hat, entweder um Messung eines Widerstandes w und einer Zeit, oder eines Widerstandes und einer Kapazität C, oder einer Kapazität und einer Zeit. Sind der Widerstand in Ohm, die Kapazität in Farad und die Zeit in Sekunden gegeben, so erhält man den Selbstinduktionskoëffizienten in Henry.

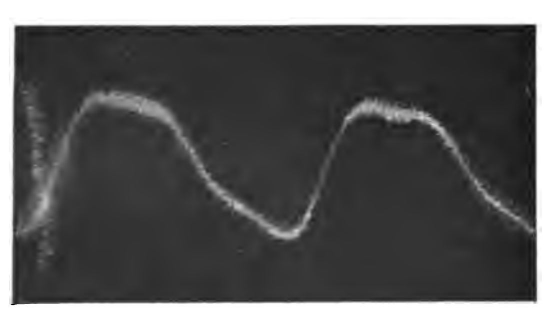


Fig. 235. Wechselstromkurve, aufgenommen mit dem Apparate von Drexler.

Indem wir im übrigen auf das in »Grundzüge der Elektrotechnik«[1]) über diese Art von Messungen Mitgeteilte verweisen, wollen wir hier nun eine neuere Methode kurz beschreiben, nach der recht befriedigende Resultate in verhältnismässig kurzer Zeit erlangt werden können.

16. Messung von Selbstinduktionskoëffizienten nach der Methode von Kempe.[2])

Die Vorrichtung S, deren Selbstinduktionskoëffizient L gefunden werden soll, wird gleichzeitig mit einem induktionsfreien Widerstand w_1 in die vierte Seite einer Wheatstone'schen Brücke eingeschaltet, und in der Brücke Gleichgewicht hergestellt, so dass die Nadel des Galvanometers G nicht ausschlägt (vergl. Fig. 236), wenn die Batterie dauernd eingeschaltet wird.

[1]) Vergl. Grundzüge der Elektrotechnik, Kap. XV, Die Messung der Induktionskoëffizienten, S. 216.

[2]) Mit Verbesserungen von Tobler. Vergl. ETZ Bd. XV, 1894, S. 584.

Man drückt den Schlüssel n des Galvanometers nieder, öffnet die Batterie und beobachtet den durch die Selbstinduktion der Spule S verursachten ersten Ausschlag des ballistischen Galvanometers G. Dieser Ausschlag sei δ_1.

Dann ersetzt man die Spule S durch einen Kondensator von bekannter Kapazität C, wie solche von allen guten Verfertigern elektrotechnischer Messapparate zu beziehen sind. Die Klemmen des Kondensators sind durch einen bekannten induktionsfreien Widerstand W geschlossen; ausserdem schaltet man dem Kondensator noch einen induktionsfreien Widerstand w_2 vor. (Vergl. Fig. 237.)

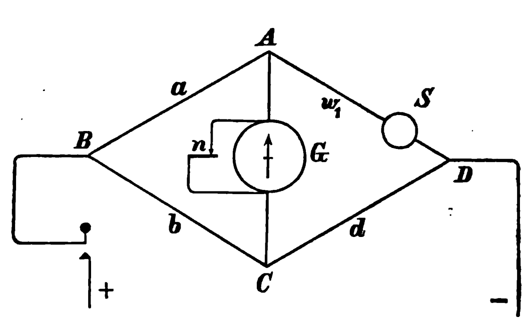


Fig. 236. Messung des Koëffizienten der Selbstinduktion nach Kempe.

Nunmehr wiederholt man den Versuch und beobachtet die Ablenkung δ_2.

Erfüllen die abgleichbaren Widerstände w_1, w_2 und W und der Ohm'sche Widerstand w des zu messenden Apparates S die Bedingung:

$$w_1 + w = W + w_2,$$

so ist der gesuchte Selbstinduktionskoëffizient L

$$L = C \cdot W^2 \cdot \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 44)$$

Man wählt die Widerstände w_1, w_2, W so, dass δ_2 möglichst gleich δ_1 wird.

Ist C in Mikrofarad und W in Ohm gegeben, so hat man das Resultat der nach Formel 44) geführten Rechnung mit 10^{-6} zu multiplizieren, um L in Henry zu erhalten.

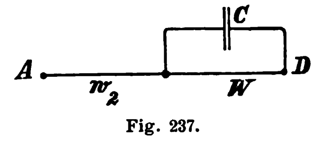


Fig. 237.

Das Galvanometer G muss starke Dämpfung haben, und sein bewegliches System muss sich so langsam bewegen, dass man bei den ballistischen Ausschlägen noch Zehntel eines Skalenteils bequem ablesen kann.

Tobler empfiehlt den Gebrauch eines astatischen Galvanometers von Siemens & Halske und eines Doppelschlüssels von Hartmann & Braun mit zwei Quecksilberkontakten.

11. Kapitel.

Regelung und Verteilung der Wechselströme.

1. Das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen.

Lange Zeit hindurch hat eine grosse Unklarheit darüber bestanden, wie Wechselstrom- und Drehstrommaschinen beschaffen sein müssen, damit dieselben bei Parallelschaltung mit gutem Synchronismus weiter laufen, und keine derselben während der Arbeit auf ein gemeinsames Verteilungsnetz ausser Tritt falle. Anfänglich glaubte man, dass ein gewisser, nicht zu niedrig bemessener Betrag von Selbstinduktion im Anker der Maschinen erforderlich sei, die zu Parallelbetrieb bestimmt seien; später neigten sich mehrere hervorragende Elektrotechniker der Ansicht zu, dass Maschinen um so leichter in Parallelschaltung arbeiteten, je geringer die Selbstinduktion im Anker sei. Jetzt weiss man, dass, von extremen Fällen abgesehen, die Parallelschaltung von der Grösse der Selbstinduktion im Anker der Maschine nur ganz wenig abhängt, dass aber aus wirtschaftlichen Gründen Maschinen mit geringer Selbstinduktion vorzuziehen sind.

Soll das Parallelschalten von Wechsel- oder Drehstrommaschinen ohne Störung, d. h. ohne Spannungsschwankungen im Verteilungsnetze sich vollziehen, so muss bei dem Zuschalten nicht nur die Spannung, sondern auch die Wechselzahl und die Stromphase der neu hinzutretenden Maschine mit den entsprechenden Grössen der bereits in Thätigkeit befindlichen Maschinen möglichst genau übereinstimmen. Sind die Maschinen einmal auf synchronen Lauf gebracht und parallel geschaltet, so suchen sie den synchronen Lauf beizubehalten, weil die Maschine mit dem verzögerten Stromimpuls durch die andere beschleunigt, die letztere dagegen verzögert wird.

Die Schwierigkeit beruht darin, dass die eine zuzuschaltende Maschine zunächst unbelastet läuft, während die anderen Maschinen bereits belastet sind, und die Regulatoren der Dampfmaschinen oder Turbinen nur dann auf die Innehaltung der angenommenen Umlaufszahl wirken, wenn die Arbeit abgebenden Maschinen eine bestimmte nicht zu geringe Belastung haben. Man kann daher, wenn nur Centrifugalregulatoren die Geschwindigkeit der Antriebsmaschinen ändern, die Belastung der einzelnen Wechselstrommaschinen nicht willkürlich ändern, ohne den Synchronismus des Systems zu gefährden.

Man versieht daher z. B. nach einem der Firma Siemens & Halske durch das D. R. P. Nr. 72 282 geschützten Verfahren die Centrifugalregulatoren der Antriebsmaschinen mit Verstellvorrichtungen, die von einem Elektromotor bewegt werden, den man vom Schaltbrett aus in der einen oder in der entgegengesetzten Richtung zum Anlaufen bringt. Dadurch wird es ermöglicht, dass die Centrifugalregulatoren bei derselben Geschwindigkeit der Maschinen je nach Bedarf eine grössere oder geringere Menge Dampf oder Wasser zuführen.

Die Verstellung der Centrifugalregulatoren kann auf verschiedene Weise bewerkstelligt werden. Man kann z. B. auf den Centrifugal-

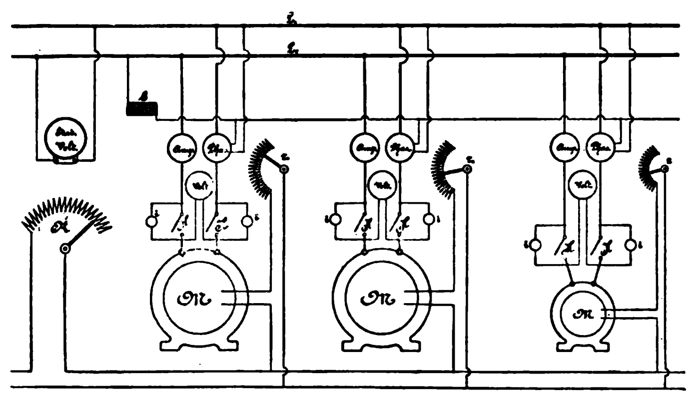


Fig. 238. Betrieb mit parallel geschalteten Wechselstrommaschinen.

regulator einen Hebelarm einwirken lassen, an dem eine Feder befestigt ist, die durch ihre grössere oder geringere Spannung der Centrifugalkraft stärker oder schwächer entgegenwirkt. Oder man kann auf einem Hebelarm ein Laufgewicht beweglich anbringen, das durch die Umdrehung eines Elektromotors vor- oder rückwärts geschoben wird; dadurch wird dann der Druck verändert, mit dem der Hebel auf den Regulator einwirkt.

Der Vorgang, der dem Abschalten einer der in Parallelschaltung thätigen Wechselstrom- oder Drehstrommaschinen vorhergeht, ist etwa der folgende:

Bei Abnahme der Belastung stellen die Centrifugalregulatoren sämtlicher Antriebsmaschinen den geringeren Zufluss an Dampf oder Wasser dadurch her, dass sie auf höhere Geschwindigkeit einstellen. Darauf werden die Regulatoren vom Schaltbrett aus so verstellt, dass sie die geringere Zufuhr an Dampf oder Wasser bei der alten Geschwindigkeit gestatten. Gleichzeitig schwächt man durch Einschalten von Widerstand in den Erregerstromkreis die Erregerstromstärke der Wechselstrommaschinen derart, dass die durch die verminderte

Belastung erhöhte Spannung der Maschinen auf den am Stationsvoltmeter vorgeschriebenen Wert zurückgeht. Solche Verminderungen der Erregerstromstärke aller Maschinen bewirkt man entweder durch Vergrösserung des Widerstandes R (Fig. 238), oder man kuppelt die Widerstände r aller Maschinen durch eine den Bühnenregulatoren der Theater ähnliche Vorrichtung und verstellt dieselben durch einen Handgriff alle gleichzeitig.

Will man eine der Wechselstrommaschinen ausschalten und die zugehörige Antriebsmaschine abstellen, so verändert man den Regulator dieser Maschine derart, dass die Dampf- oder Wasserzufuhr nach und nach kleiner wird. Die Geschwindigkeit der Maschine ändert sich dabei aber nicht erheblich. Da der Synchronismus zunächst erhalten bleibt, ist eine merkliche Geschwindigkeitsänderung auch nicht zu befürchten. Die Leistung der Maschine aber und ihre Stromstärke wird kleiner und kleiner. Sowie die Leistung am Wattmeter oder die Stromstärke am Ampèremeter Null wird, was man vollends durch Schwächung der Erregung, also durch Vergrösserung des Widerstandes r der betreffenden Maschine, erreicht, schaltet man durch Öffnen der Hauptausschalter HH die Maschine ab und stellt die Antriebsmaschine auf Ruhe.

Will man umgekehrt zu in Betrieb befindlichen Maschinen eine neue hinzuschalten, so setzt man die Antriebsmaschine in Bewegung und erhöht die Umdrehungszahl durch Steigerung der Zufuhr von motorischer Substanz mehr und mehr. Hierauf sendet man einen Erregerstrom von der erforderlichen Stärke durch die Feldmagneten und macht die Maschinenspannung gleich der Netzspannung. Wenn die Umlaufszahl der Wechselstrommaschine nahezu die normale Höhe erreicht hat, schaltet man den Phasenanzeiger ein und schliesst in dem Augenblicke, in dem die Spannung und die Phase der zuzuschaltenden Maschine der des Netzes gleich ist, den Hauptausschalter.

Durch Erhöhung der Zufuhr an motorischer Substanz belastet man dann die zugeschaltete Maschine nach Bedarf mehr und mehr.

Die beiden Hilfsvorrichtungen, die hierbei zur Anwendung kommen, die Verstellvorrichtung für die Centrifugalregulatoren und der Phasenvergleicher, sollen im Anschluss hieran sofort beschrieben werden. Wir wollen hier nur noch erwähnen, dass bei Benutzung dieser Vorrichtung von Siemens & Halske, deren Wirksamkeit wir soeben beschrieben haben, das Zu- und Abschalten von Wechselstrom- und Drehstrommaschinen auch ohne Hinzunahme von Belastungswiderständen geschehen kann.

Andere Firmen verfahren dagegen vielfach so, dass sie grosse induktionsfreie Belastungswiderstände in ihren Wechselstromanlagen

aufstellen, deren einzelne Teile je nach Bedarf vom Schaltbrett aus durch eine Art Klaviatur eingeschaltet, ausgeschaltet oder parallel geschaltet werden können.

Beim Hinzufügen einer neuen Maschine lassen sie diese zunächst auf den Belastungswiderstand arbeiten und steigern durch Vermehrung der Dampfzufuhr und Verstärken des Erregerstromes die Spannung und die Belastung bis zur normalen Höhe. Wenn die Periodenzahl der Maschine ziemlich genau mit der der übrigen Maschinen übereinstimmt, wird der Phasenvergleicher eingeschaltet. Zeigt derselbe an, dass beide Maschinen in gleicher Phase sind, so wird der Hauptausschalter H H, der die Verbindung mit den Sammelschienen herstellt, geschlossen.

Wenn die neue Maschine nun synchron mit den übrigen weiter läuft, wird in dem Masse, als die Belastung im Verteilungsnetz mehr und mehr wächst, allmählich der Belastungswiderstand herausgenommen, indem man parallel geschaltete Widerstände entfernt. Durch Beobachtung des Phasenmessers erkennt man gleichzeitig, in welchem Sinne dabei etwa der Erregerstrom zu verändern ist. Schliesslich entfernt man den Belastungswiderstand ganz und verteilt die Leistung möglichst zweckmässig auf alle im Gange befindlichen Maschinen derart, dass keine derselben einen Rückstrom aus dem Netze empfängt.

Bei Abnahme der Belastung verfährt man dann genau umgekehrt. Man belastet die abzuschaltende Maschine mehr und mehr mit Belastungswiderstand und vermindert die Erregerstromstärke so lange, bis das Ampèremeter, das zwischen den Sammelschienen und dieser Maschine angeordnet ist, gerade auf Null zeigt. In diesem Momente öffnet man den Hauptausschalter und lässt nun Geschwindigkeit, Strom und Spannung allmählich bis auf Null sinken. Dann löst man den Belastungswiderstand von der zur Ruhe gelangten Maschine ab, um ihn in gleicher Weise für die Stillsetzung des nächsten Maschinenaggregates zu verwenden.

2. Die Verstellvorrichtung der Centrifugalregulatoren.

Wir beschreiben im nachfolgenden diejenige Form der Ausführung dieser für die Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen so wertvollen Einrichtung, wie sie von Siemens & Halske bei der elektrischen Centrale mit Drehstrom in Chemnitz zur Anwendung gekommen ist.

An jeder Säule, die den Centrifugalregulator der Betriebsdampfmaschine trägt, ist ein kleiner Elektromotor befestigt, der vom Schaltbrett der Centrale aus angelassen und umgesteuert werden kann. Auf der Motorwelle a (vergl. Fig. 239) ist eine Schnecke befestigt,

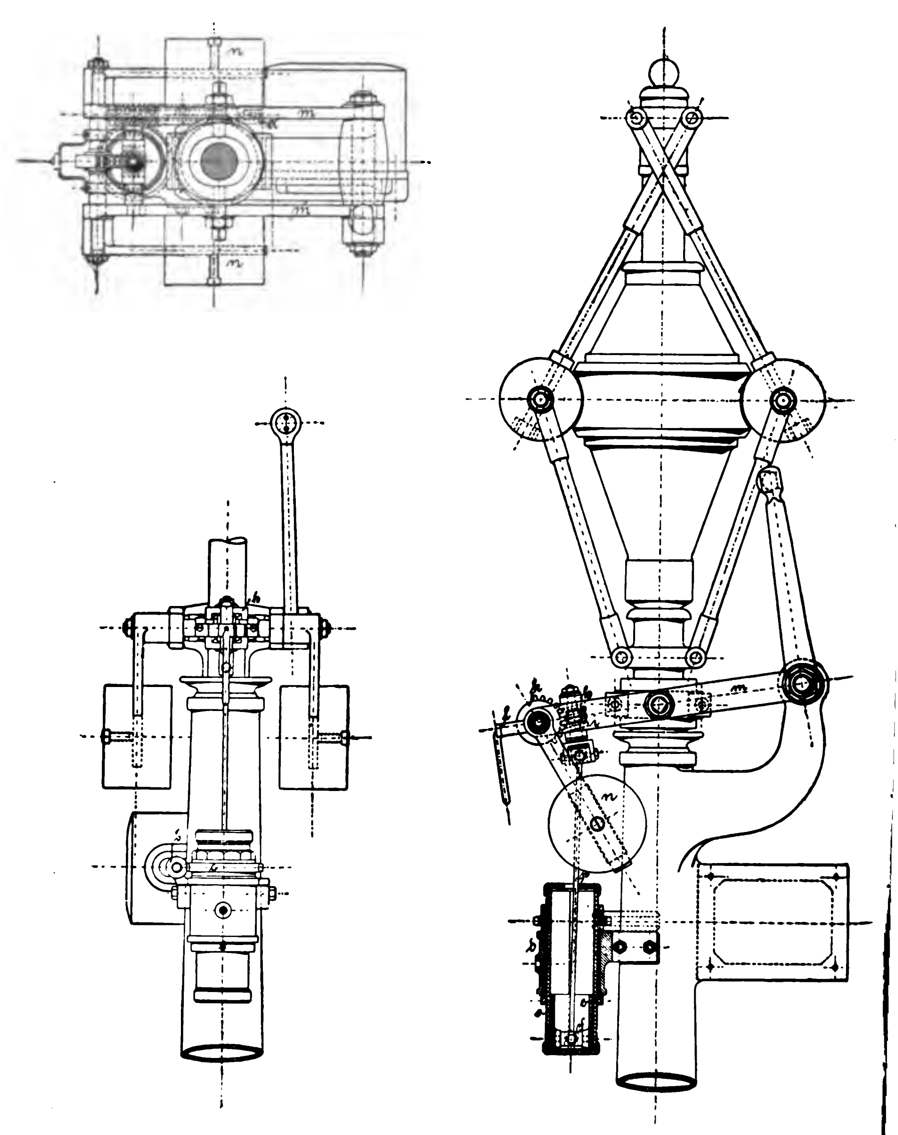


Fig. 239. Steuervorrichtung von Siemens & Halske für Dampfmaschinen, die parallel geschaltete Wechselstrommaschinen antreiben.

durch die das Schneckenrad c in Umdrehungen versetzt wird. Dieses Schneckenrad c sitzt auf einer längeren Büchse, die von einem Halslager d getragen wird und einen im Innern der Längsnuten laufenden Schlitten e enthält. Durch zwei Kreuzgelenke f und g und

die elastische Welle p wird die Bewegung nach der oberen Schnecke i und von dieser auf das Rad k übertragen. Durch die Drehung des Rades k werden die beiden Gewichte n verstellt und damit die Belastung des Centrifugalregulators nach Bedarf geändert. Am Rade k sind nur so viele Zähne vorgesehen, als für die Erreichung zweier äusserster Einstellungen nötig ist. Durch Federn wird die Schnecke i zum Eingriff in das Schneckenrad k gebracht. Mit Hilfe eines Handgriffes l kann man aber auch die Schnecke vom Schneckenrade abheben und die Gewichte n in eine bestimmte Lage einstellen; nach dem Wiedereinrücken werden die Gewichte dann in dieser Lage vom Rade k festgehalten.

Den Strom für die Elektromotoren liefern die Erregermaschinen der Stromerzeuger, und am Schaltbrett befinden sich Doppeltaster, durch die man jeden Elektromotor in der einen oder anderen Drehrichtung in Bewegung setzen kann.

3. Der Phasenvergleicher.

In der nebenstehenden Fig. 240 stellt die Kurve I den zeitlichen Verlauf der Wechselspannung einer Maschine und die Kurve II die Wechselspannung einer zweiten Maschine oder eines Netzes mit etwas grösserer Periodenzahl graphisch dar. Zu dem Zeitpunkte A sind die Phasen beider Wellenlinien gerade entgegengesetzt, zur Zeit B sind dagegen

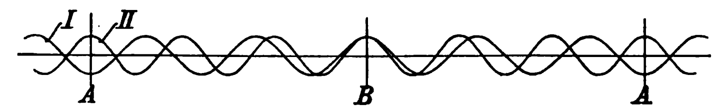


Fig. 240. Die Wechselspannung zweier Maschinen mit wenig verschiedener Periodenzahl.

die Phasen beider Maschinen gerade gleich geworden. Genau zu diesem Zeitpunkte B muss daher das Parallelschalten beider Maschinen stattfinden. Sind sie einmal parallel geschaltet, so suchen sie auch dauernd im Zustande der Übereinstimmung der Phase fortzulaufen.

Um den Moment der Phasengleichheit zu erkennen, lässt man die beiden Wechselspannungen I und II, beide gleichzeitig auf eine Glühlampe, die Phasenlampe, wirken. Diese Lampe wird abwechselnd aufleuchten und dunkel werden, je nachdem die beiden Spannungen sich addieren oder sich aufheben.

Ist die Betriebsspannung hoch, so schliesst man die Leitungen an die Primärwickelungen zweier kleiner, gleichgrosser Transformatoren an und schaltet die Phasenlampe zwischen die hintereinander geschalteten sekundären Wickelungen dieser Reduktionstransformatoren.

Um nun den Gebrauch des Phasenvergleichers zunächst für die

Parallelschaltung von Drehstrommaschinen zu erläutern, teilen wir nach einer kleinen Schrift von Siemens & Halske[1]) das Schaltungsschema für drei Drehstrommaschinen mit, deren Feldmagneten von zwei Sammelschienen aus den erforderlichen Gleichstrom empfangen. (Vergl. Fig. 241.) An diese Gleichstrom-Sammelschienen geben, der grösseren Betriebssicherheit wegen, zwei parallel geschaltete Gleichstrommaschinen den erforderlichen Strom ab.

Die Drehstrommaschinen liefern ihren Strom an drei Sammel-

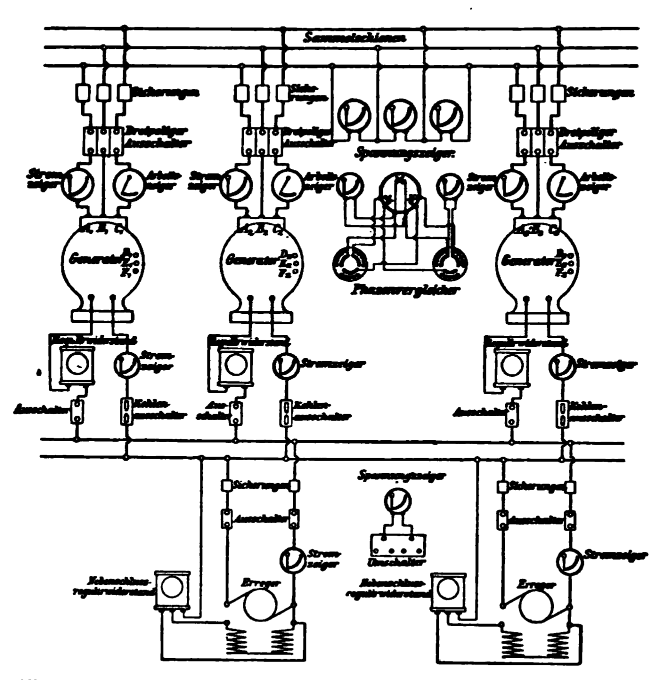


Fig. 241. Parallel geschaltete Drehstrommaschinen nebst Zubehör.

schienen (oben in Fig. 241), an die das Verteilungsnetz angeschlossen ist. Die verschiedenen erforderlichen Messinstrumente, Ausschalter, Bleisicherungen, Regulierwiderstände und sonstiges Zubehör sind angedeutet.

Handelt es sich um Wechselstrom, so fallen die von B und E ausgehenden Leitungen und die in diese Leitungen eingeschalteten Instrumente in der ganzen Anlage weg. Sind die von den Maschinen erzeugten Spannungen niedrig, so werden die Klemmen A_1, B_1, C_1,

[1]) Siemens & Halske, Anweisung 3 zum Parallelschalten von Drehstrom- und Wechselstrommaschinen, Berlin, Juni 1896.

ferner A_2, B_2, C_2 und A_3, B_3, C_3 unmittelbar mit den Klemmen a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3 u. s. w., der in Fig. 242 besonders dargestellten doppelpoligen Umschalter verbunden.

Mit dem rechts in Fig. 242 angedeuteten Spannungszeiger misst man zunächst die Spannung zwischen den Klemmen a_n, b_n der zuzuschaltenden Maschine und vergleicht diese mit der Spannung der bereits im Betriebe befindlichen Maschinen. Die Spannungen zwischen b_n c_n und c_n a_n bleiben unberücksichtigt.

Sind die gemessenen Spannungen gleich, so werden nunmehr die Geschwindigkeiten und die Phasen verglichen.

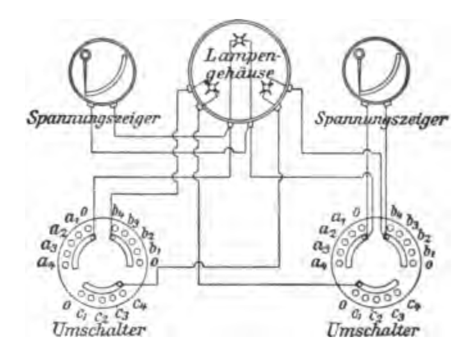


Fig. 242.
Untersuchungen der Phasengleichheit parallel zu schaltenden Stromerzeuger

Man stellt den linken Umschalter auf eine der bereits synchron arbeitenden Maschinen (z. B. Maschine I), den rechten auf die zuzuschaltende Maschine (z. B. Maschine II).

Dann liegt die obere Lampe zwischen a_1 und a_2 und die Lampe links unten zwischen b_1 und c_2. Infolge dieser Vertauschung der Klemmen b_2 und c_2 werden die Lampen bei ungleicher Geschwindigkeit nicht gleichzeitig hell und dunkel, sondern eine nach der anderen. Läuft Maschine I rascher als Maschine II, so geht die Folge, in der die Lampen nach einander aufglühen und wieder dunkel werden, in der Uhrzeigerrichtung. Läuft die Maschine II rascher als I, so geht die Folge des Aufleuchtens entgegengesetzt dem Uhrzeiger.

Bei annähernder Gleichheit der Umlaufszahlen beider Maschinen ist die Richtung der Drehung des Aufleuchtens sehr gut zu verfolgen.

Man wartet nun den Augenblick ab, in dem die oberste Lampe, »die Phasenlampe« dunkel ist und der zu ihr parallel geschaltete linke Spannungszeiger auf Null zeigt. In diesem Moment stimmen die Phasen der beiden diese Lampen im entgegengesetzten Sinne durchfliessenden Wechselströme überein, und man kann, falls auch die Spannungen der Maschinen gleich gross sind, die Einschaltung der neuen Maschine vornehmen, ohne dass eine Störung in der Betriebsspannung eintritt.

Da die Lampen in der Zwischenzeit, an den Punkten A A in Fig. 240, mit der Summe der Spannungen, also der doppelten Spannung, aufleuchten, müssen dieselben für die doppelte Betriebsspannung gewählt oder zwei Lampen hinter einander geschaltet werden.

Wenn die von den Maschinen gelieferten Spannungen hoch sind, würde man unter Umständen zu viele Lampen hinter einander schalten müssen, um diese Spannung aufzunehmen. Man verbindet dann die Enden eines geeigneten Teiles der Wickelung, der etwa eine EMK von 50 Volt giebt, mit drei Klemmen D_n, E_n, F_n (vergl. Fig. 243), verbindet diese mit den Klemmen a_n, b_n, c_n der doppelpoligen Umschalter in Fig 242 und verfährt im übrigen wie vorher.

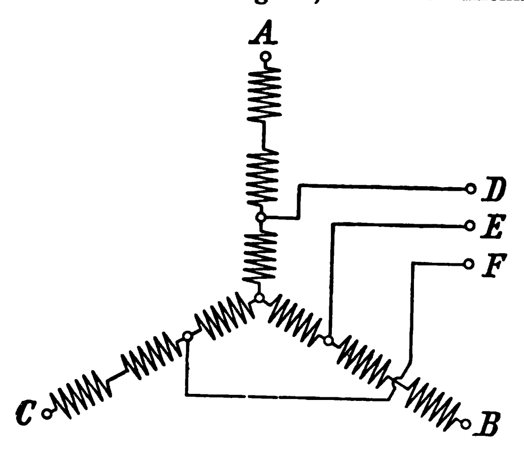


Fig. 243. Schaltung bei Maschinen, die hohe Spannung geben.

Vielfach wird auch, um jede Möglichkeit einer Berührung von Stellen, die hohe Spannung führen, auszuschliessen, zwischen die Punkte D_n, E_n, F_n und a_n, b_n, c_n ein Drehstromtransformator gelegt, ein sogenannter Isolationstransformator, der nicht den Zweck hat, die Spannung auf eine andere Höhe zu transformieren, sondern vorzugsweise dazu dient, eine vorzügliche Isolation zwischen der Maschinenwickelung und der Messleitung herzustellen. Will man die hier beschriebene Methode ohne weiteres für Wechselstromanlagen anwenden, so muss die Maschine noch eine Hilfswickelung erhalten, die einen in der Phase verschobenen Strom liefert.

Das Einschalten von Synchronmotoren erfolgt in derselben Weise, wie das Parallelschalten von Maschinen, indem man den Motor zunächst möglichst genau durch eine fremde Kraft auf die Geschwindigkeit des Synchronismus bringt. Um hierbei an dem Umschalter die erforderliche niedrige Spannung zu erhalten, muss man einerseits an die Klemmen der Motoren, anderseits an die Fernleitung einen Reduktionstransformator anschliessen. Die Anordnung beim Phasenvergleicher und das Verfahren beim Einschalten des Motors stimmt mit den für das Parallelschalten von Stromerzeugermaschinen überein. Das Abschalten von Synchronmotoren erfolgt erst, nachdem die Belastung derselben zuvor auf Null gebracht worden ist.

Für einfache Wechselstromanlagen kann die Einrichtung wesentlich vereinfacht werden; sie besteht dann nur (vergl.

Fig. 244) aus einem Spannungszeiger, zwei Glühlampen und zwei zweipoligen Mehrfachumschaltern.

Der Spannungszeiger dient sowohl zum Vergleich der Maschinenspannungen, als auch zum Erkennen der Phasengleichheit der einzuschaltenden mit der im Betriebe befindlichen Maschine.

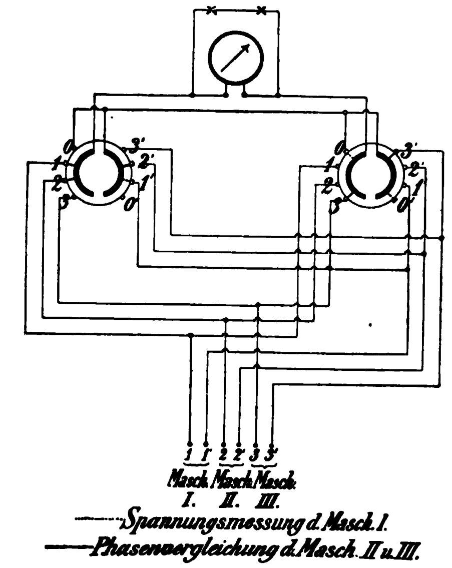


Fig. 244. Phasenvergleichung bei einfachen Wechselstrom.

Einer der Umschalter wird auf 0 gestellt und durch den anderen die Verbindung mit der zu messenden Maschine hergestellt. Für das Beobachten der Phasengleichheit wird je einer der beiden Umschalter mit den zu vergleichenden Maschinen verbunden. Wenn die Glühlampen, durch die wieder beide Wechselströme in entgegengesetzter Richtung fliessen, etwa $^1/_4$ bis $^1/_2$ Minute dunkel bleiben, wird in der Mitte dieses Zeitraumes, wenn der Spannungszeiger auf Null zeigt, durch Schliessen der Hauptausschalter das Parallelschalten der Maschinen vollzogen.

4. Phasenregler.

Bei Energieübertragung von einer Wechselstrommaschine auf eine andere, also bei dem Betriebe von Synchronmotoren, ist es wünschenswert, mit möglichst geringer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung arbeiten zu können, weil dann die Anker der Maschinen und die Leitung mit der kleinsten Stromstärke belastet werden und die Verluste durch Stromwärme etc. am kleinsten ausfallen. Jeder Wert der Stromstärke der Übertragung kann nun im allgemeinen mit zwei verschiedenen Spannungen erreicht werden; bei der kleineren Spannung ist selbstverständlich die Phasenverschiebung geringer, als bei der grösseren. Man wählt die Erregung des Feldes am Motor so, dass die Spannung einen wenig höheren Wert annimmt, als diesen kleinsten, damit bei plötzlicher Zunahme der Belastung der Motor nicht stehen bleibt. Man erregt daher das Feld des Motors im allgemeinen für etwas höhere Spannung als die des Stromerzeugers, wenig höher als bis zu dem Werte, bei dem die geringste Stromstärke in der Leitung beobachtet wurde.

Für Energieübertragungen mit mehrphasigem Wechselstrom würde dieses Mittel nicht ohne weiteres zum Ziele führen. Nach einem von Swinburne herrührenden und von Herrn von Dolivo-Dobrowolski zuerst praktisch angewendeten Vorschlage schaltet man in diesem Falle eine leerlaufende Mehrphasenmaschine an der Stelle ein, wo sich vorzugsweise die Elektromotoren befinden. Das Feld dieser leerlaufenden Maschine, des sogenannten Phasenreglers, erregt man etwas stärker als der Betriebsspannung entspricht. Der Strom, den eine solche Maschine beim Leerlauf verbraucht, beträgt nur wenige Prozent des Betriebsstromes, aber er eilt der EMK voraus. Bei richtiger Wahl der höheren Spannung kann man auf diese Weise das Zurückbleiben des Stromes hinter der Spannung, wie es belastete Elektromotoren oder auch Transformatoren immer veranlassen, völlig ausgleichen, so dass sich in der Leitung Strom und Spannung in gleicher Phase befinden.

5. Ulbrichts System des einfachen Wechselstrombetriebes für Beleuchtungszwecke von Dreiphasenmaschinen aus.

Bei der Anlage des Elektrizitätswerkes der Dresdener Bahnhöfe hatte sich das Bedürfnis herausgestellt, für Beleuchtungszwecke gewöhnlichen einphasigen Wechselstrom, für den Betrieb von Elektromotoren dagegen Dreiphasenstrom zur Verfügung zu haben. Diese Aufgabe ist[1]) von Baurat Ulbricht unter Mitwirkung der Firma Siemens & Halske in technisch und wirtschaftlich durchaus befriedigender Weise gelöst worden.

Anfänglich wurde in Erwägung gezogen, ob man nicht Wechselstrommaschinen und -Transformatoren für den weit überwiegenden Lichtbetrieb und Drehstrommaschinen und -Transformatoren für den Betrieb von Elektromotoren anwenden und beide parallel schalten sollte. Eine Reihe von Versuchen hatte gezeigt, dass dies völlig angängig sei. Mit Rücksicht auf die Grösse des Kraftbedarfes aber, und um eine grössere Reserve zu haben, wurden schliesslich alle Maschinen und Transformatoren für Drehstrom gewählt. Wir bemerken zunächst, dass jede Drehstrommaschine ohne weiteres als gewöhnliche Wechselstrommaschine gebraucht werden kann. Bei Sternschaltung (vergl. Kap. VI, 1., S. 154) bleiben die Verbindungen zweier Zweige genau wie vorher; der dritte Zweig wird abgetrennt und hinter die beiden anderen geschaltet. Ist die EMK für einen Zweig E, so ist sie für die beiden Zweige $E \cdot \sqrt{3}$ und für alle drei Zweige 2 E. Der dritte Zweig erhöht also die EMK nur wenig; die Verluste durch

---

[1]) Ende des Jahres 1892.

Stromwärme und die Nachteile der Vergrösserung der Ankerreaktion durch den dritten Zweig machen sich dagegen sehr stark geltend. Es liegt daher der Gedanke nahe, bei dem Gebrauche einer Drehstrommaschine zur Erzeugung von Wechselstrom den dritten Zweig einfach auszuschalten. Bei der Anlage auf den Dresdener Bahnhöfen ist die gesamte Beleuchtung in eine Phase verlegt (sie liegt also zwischen den Enden zweier Wickelungen), und in dieser Phase wird die Spannung während des Betriebes genau konstant erhalten. Für Motorbetrieb werden alle drei Phasen verwendet, und für diesen spielen geringe Schwankungen in der Spannung keine wesentliche Rolle.

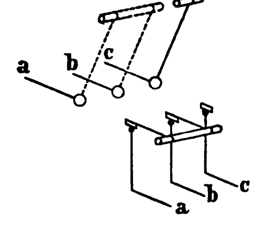


Fig. 245. Die Ausschalter des Dresdener Bahnhof-Elektrizitätswerkes.

Selbstverständlich entstehen dann stärker und minder belastete Phasen, und dadurch wird das Drehfeld etwas verzerrt; da aber der Lichtbetrieb mit dem Motorbetriebe nur während eines sehr geringen Teiles der gesamten Betriebszeit zusammenfällt, so würde selbst ein etwas weniger günstiger Wirkungsgrad der Motoren in dieser kurzdauernden Periode die Wirtschaftlichkeit des gesamten Betriebes nicht sonderlich ungünstig beeinträchtigen. Die Versuche haben aber ergeben, dass die den Drehstrom erzeugenden Maschinen nur um wenig breiter gebaut werden müssen, und dass ein ungünstiger Einfluss auf die Anzugskraft und Leistung der Elektromotoren kaum wahrnehmbar ist.

Es zeigte sich ferner, dass, wenn man eine Drehstrommaschine für Motorbetrieb einer oder mehreren Drehstrommaschinen parallel schaltete, deren dritte Wickelung ausgeschaltet war, die in den drei Leitungen vorkommende Drehstromarbeit von der Drehstrommaschine allein geleistet wurde, sofern sie nur gross genug war, und ihrer Dampfmaschine die ihrer Leistung entsprechende Dampfmenge zugeführt wurde. Der Lichtbetrieb wurde dann einzig von der als Wechselstrommaschine mit zwei Wickelungen und einer Phase thätigen Maschine allein geleistet; das Einrücken und Ausschalten von Elektromotoren beeinträchtigte deren Spannung durchaus nicht mehr in störender Weise. Die Hauptausschalter der Maschinen sind daher durchschnitten worden (vergl. Fig. 245), so dass jede der Drehstrommaschinen mit zwei oder mit drei Wickelungen an die Leitungen gelegt werden und mit einer oder mit drei Phasen arbeiten konnte.

Die Schaltung gestaltet sich dann so, wie dies Fig. 246 zeigt, wobei angedeutet ist, dass die dritte im allgemeinen minder belastete Leitung dünner gewählt werden kann, als die beiden anderen.

Die folgenden beiden Abbildungen Fig. 247 und Fig. 248 zeigen

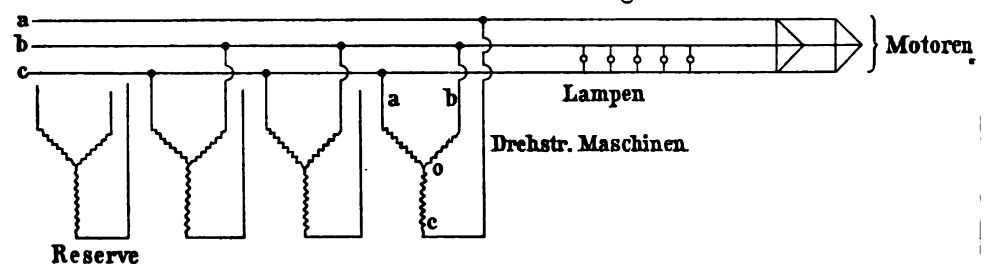


Fig. 246. Schaltung des Elektrizitätswerkes der Dresdener Bahnhöfe.

den zeitlichen Verlauf der Spannungen in den drei Zweigen, einmal bei einer Drehstromschaltung und dann bei Ausschaltung der einen Wickelung.

Sämtliche Maschinen und Transformatoren haben Sternschaltung.

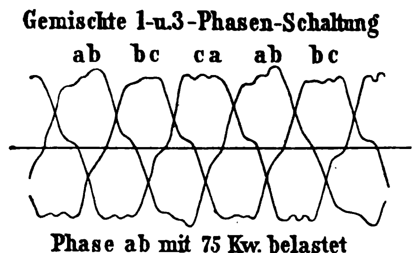


Fig. 247. Spannungskurven einer Drehstrommaschine, die nur mit zwei Wickelungen arbeitet.

3-Phasen-Schaltung
ca ab bc ca
Phase ab mit 25 Kw. belastet
" bc leer
" ca "

Fig. 248. Spannungskurven einer Drehstrommaschine, die nur mit zwei Wickelungen arbeitet.

Die Elektrizitätszähler, einfache Wechselstromzähler, sind, zu je drei gruppiert, sternförmig an den Nullpunkt geschaltet. Aus den drei Ablesungen A_{ao}, A_{bo}, A_{co} kann die Energieabgabe für Lichtbetrieb und Motorbetrieb mit einer für die Praxis genügenden Genauigkeit getrennt bestimmt werden, und zwar ist die für Lichtbetrieb in der Phase bc verbrauchte Energie

$$A_L = A_{ao} + A_{bo} - 2\,A_{co} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

und die für Motorbetrieb in den drei Phasen verbrauchte Energiemenge:

$$A_M = 3\,A_{co} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Die Dresdener Anlage ist nunmehr bereits einige Jahre im Betrieb und hat sich in jeder Beziehung, sowohl was die Ruhe des Lichtes anbetrifft, als hinsichtlich der Leistungen der Drehstrommotoren trefflich bewährt.

6. Das Mono- und Polycyklische System von Ch. Pr. Steinmetz.

Kurze Zeit nach der Inbetriebsetzung der ersten Teile der von Ulbricht entworfenen Anlage hat der berühmte amerikanische Elektriker Steinmetz auf eine Reihe verwandter Schaltungen amerikanische Patente genommen, bei denen auch Mehrphasenströme für Motorbetrieb erzeugt und für Beleuchtungszwecke einfacher Wechselstrom entnommen wird. Dem Reklamebedürfnis der neuen Welt entsprechend, hat er dafür die in der Überschrift genannten, vollklingenden Na-

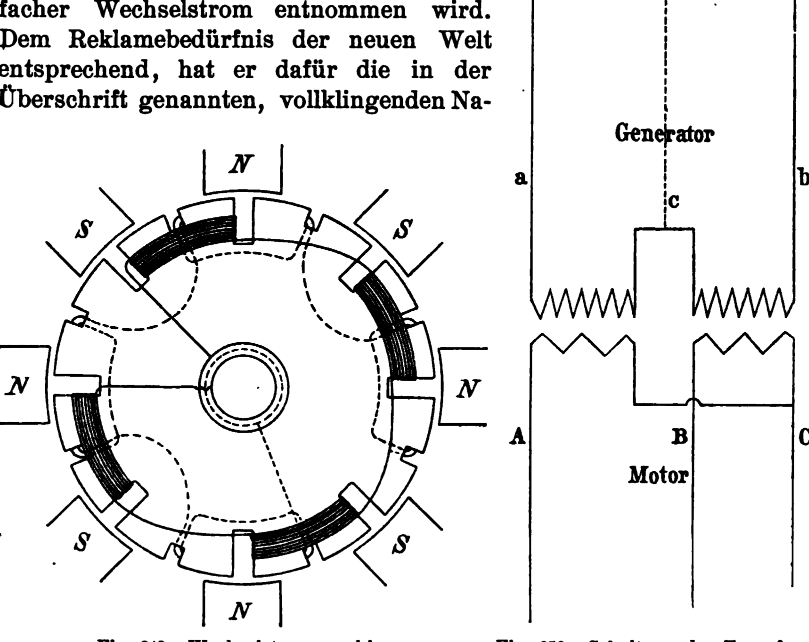


Fig. 249. Wechselstrommaschine für das monocyklische System von Steinmetz.

Fig. 250. Schaltung der Transformotoren bei dem monocyklischen Systeme.

men gewählt, deren Anwendung jedoch bei uns bedenklich erscheint, da die Worte cyklisch und monocyklisch bereits von Helmholtz für gewisse Massensysteme in der Thermodynamik verwendet und allgemein angenommen worden sind. Während Ulbricht Drehstrommaschinen mit drei gleichen Wickelungszweigen bei seinem System verwendet, benutzt Steinmetz Wechselstrommaschinen mit einer Hilfswickelung, die einen in der Phase verschobenen Strom für den Motorbetrieb liefern. Auf dem Anker einer Wechselstrommaschine ist eine gegen die Hauptspule versetzte weitere Wickelung angeordnet (vergl. Fig. 249); das eine Ende derselben ist an die Mitte der Haupt-

wickelung angeschlossen, das andere Ende führt zu dem dritten Leitungsdrahte. Diese dritte Windung hat jedoch nur ein Viertel der Windungen und liefert deshalb eine wesentlich niedrigere EMK.

Die Fig. 249 zeigt schematisch die Anordnung einer solchen Mehrphasenmaschine nach Steinmetz. In der Mitte zwischen den Nuten des Ankers, die die Hauptwickelung tragen, befindet sich ein zweites System kleinerer Nuten, in die die Nebenwickelung eingelagert ist. Die drei konzentrischen Kreise in der Mitte deuten die drei Schleifringe an, an die die Enden der Hauptwickelung (ausgezogen) und das eine Ende der Nebenwickelung (gestrichelt) geführt ist. Der Strom, der in der Hilfswickelung erzeugt wird, kehrt somit über die beiden Hälften der Hauptstromwickelung zurück und hat daher, ausser der

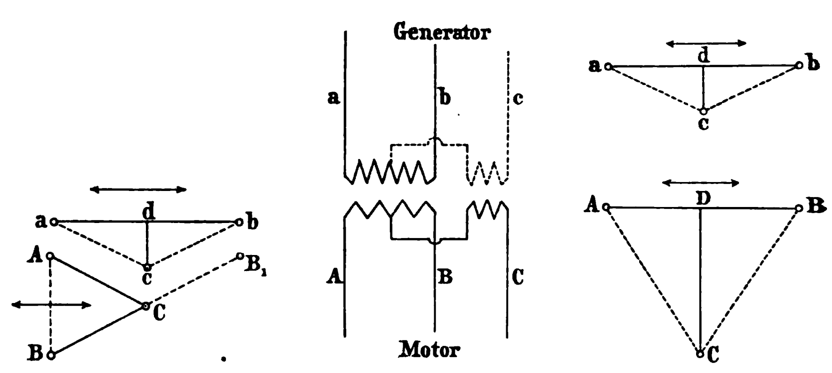


Fig. 251. Spannungsdiagramme beim monocyklischen System.

Fig. 252. An der Schaltung beim monocyklischen System.

Fig. 253. Spannungdiagramme bei abgeänderter Schaltung

eigenen, auch die Selbstinduktion der Hauptspulen zu überwinden.

Die nächste Abbildung (Fig. 250) zeigt die Verbindung der Stromerzeuger mit den Motoren durch die Transformatoren. Da die Sekundärspule des zweiten Transformators umgekehrt geschaltet wird, wird die sekundäre Spannung CB statt CB_1 (in Fig. 251). Dadurch wird aus dem Dreieck abc der primären Spannungen im sekundären Stromkreise das Spannungsdreieck ABC. Die Seite AB ist gleich dem doppelten der Hilfsspannung multipliziert mit dem Umsetzungsverhältnis der Transformatoren. Die Motorwindungen bestehen aus drei um 120^0 in der Phase gegeneinander verschobenen Wickelungen, wie bei jedem gewöhnlichen Drehstrommotor.

Statt zwei gleiche Transformatoren anzuwenden, kann man auch einen grösseren und einen kleineren Transformator benutzen und die Schaltung gebrauchen, die in Fig. 252 gezeichnet ist. Die von der Hilfswickelung cd erzeugte Spannung wird in einem grösseren Umsetzungsverhältnis transformiert, so dass das Dreieck der sekun-

dären Spannungen ABC (Fig. 253) nahezu gleichseitig wird. Auch bei dieser Anordnung können an die Klemmen A B C Drehstrommotoren angeschlossen werden.

Ein Unterschied zwischen dem Ulbricht'schen und dem Steinmetz'schen System dürfte, abgesehen von den eigentümlichen Schaltungen, darin zu erkennen sein, dass die Maschinen und Motoren bei Steinmetz in der Hauptsache nur beim Anlaufen und bei Belastungsänderungen als Mehrphasenmaschinen, dann aber in der Hauptsache als Einphasenmaschinen und Einphasenmotoren weiter laufen, und dass zwar die Spannungen, nicht aber die Ströme erhebliche Phasenverschiebungen besitzen.

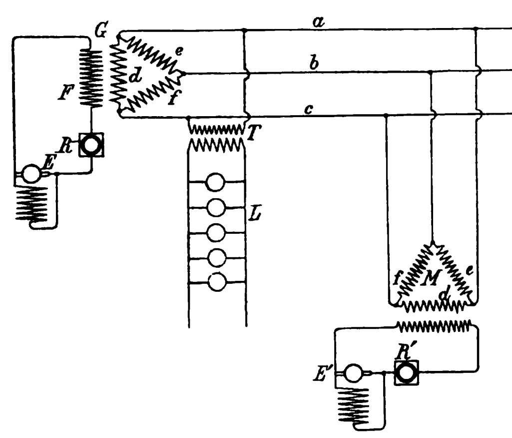


Fig. 254. Schaltung beim polycyklischen System von Steinmetz.

Dem monocyklischen System für Wechselstromverteilung hat Steinmetz (General Electric Co.) das polycyklische folgen lassen; hauptsächlich soll es das elektrische Gleichgewicht aufrecht erhalten, wenn an denselben Stromkreis Lampen und Motoren angeschlossen sind. Das Prinzip erhellt aus der Fig. 254. Die Feldmagnete F des Stromerzeugers werden von dem Erreger E gespeist. Die Armatur ist die einer Dreiphasenmaschine, welche in der Zeichnung in der Dreieckschaltung verbunden ist. Die Lichtleitung L steht durch einen Transformator T mit den Leitern a c, die Motoren mit a b c in Verbindung. Das Neue an dem System besteht darin, dass die Konsumstellen für einfachen Wechselstrom an einen Zweig angeschlossen werden, und dass zwischen diesem und dem anderen Stromkreise durch eine Motorspule Energieübertragung stattfindet. Es sei beispielsweise die Lampenbelastung in einer Anlage ein Drittel der Motorbelastung, dann wird die Selbstinduktion der mit d bezeichneten Spulen des Generators und des Motors oder der Widerstand und die Selbstinduktion der Hauptleitung so sein, dass bei normaler Belastung in ihnen kein Strom von a c fliesst, welcher Zweig vielmehr die Lampen speisen wird, während die Motoren ihre Energie aus den beiden anderen Zweigen b c und a b erhalten. Es wird also, praktisch genommen, Gleichgewicht zwischen der elektromotorischen Gegenkraft,

welche in der Motorspule d erzeugt wird, und der »aufgedrückten EMK« in dem Lichtstromkreis bestehen.

Wenn das Verhältnis aber gestört wird, z. B. durch Veränderung der Spannung infolge der Lampenbelastung, so wird das Gleichgewicht durch den Strom der Motorspuled aufrecht erhalten, welcher je nach den Verhältnissen die Lampen oder die Motoren unterstützt. Die Spulen e und f haben weniger Windungen als die entsprechenden des Stromerzeugers, so dass sie im normalen Betrieb Kraftströme erhalten.

Während die Regulierung bei dem monocyklischen System so gedacht ist, dass der Lichtstromkreis zugleich die Motoren, welche bereits mit normaler Geschwindigkeit laufen, speist, und die Motorleitung bei Schwankungen, wie z. B. beim Anlauf, in Anspruch genommen wird, so soll umgekehrt bei dem polycyklischen System eine Regulierung dadurch hervorgebracht werden, dass die Motorleitung, welche stets die Energie der normal laufenden Motoren liefert, selbstthätig die Spannung der Lichtleitung erhöht, falls diese stärker als der Normalwert beansprucht wird. Der Unterschied ist mit anderen Worten ausgedrückt der: Bei dem monocyklischen System ist es die an die Aussenleiter angeschlossene Spule, welche infolge geringerer elektromotorischer Gegenkraft als die anderen (e und f) die Energie beim normalen Betrieb aufnimmt; bei dem polycyklischen System sind es die Spulen e und f, welche die Energie aufnehmen, und die mit höherer Gegenkraft ausgestattete Spule d ist im Normalbetrieb stromlos, wirkt aber ausgleichend durch Stromerzeugung, sobald die Belastung des Lampenzweiges steigt.

Diese dem »Electrical Engineer« [1]) entnommene Beschreibung enthält wohl, wie bisher alle diesbezüglichen Mitteilungen der General Electrical Company, nicht ohne Absicht einige Unklarheiten, um dadurch noch mehr den Eindruck hervorzurufen, dass eine völlig neue Erfindung vorliege.

Allem Anschein nach handelt es sich aber auch hier um den Vorschlag der Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen mit Dreiphasenmaschinen, also um denselben Grundgedanken, der bereits in dem Ulbricht'schen System in grossem Massstabe auf dem Dresdener Bahnhofe zur praktischen Ausführung gekommen ist, nur dass die Unterdrückung der Wirkung der dritten Wickelung der Dreiphasenmaschine bei Ulbricht auf mechanischem Wege ausgeführt, bei Steinmetz angeblich auf elektrischem Wege erreicht wird. [2])

---

[1]) N. Y. (1895, S. 486), ETZ Bd. XVI, 1895, S. 587 u. s. f.

[2]) Solchen, die sich für diese Schaltungen interessieren, ist auch das Studium der Amerikanischen Patentschrift No. 4129/32 von Schallenberger zu empfehlen.

7. C. F. Scotts Umwandlung eines Zweiphasen- in ein Dreiphasensystem.

Eine Zweiphasenmaschine liefert ihre beiden in der Phase gegen einander verschobenen Ströme an zwei Transformatoren T_1 und T_2. (Vergl. Fig. 255.) Das eine Ende der Sekundärspule des Transformators T_1 ist in der durch die Fig. 256 angedeuteten Weise mit der Mitte der Sekundärwickelung von T_2 verbunden. Es entstehen auf

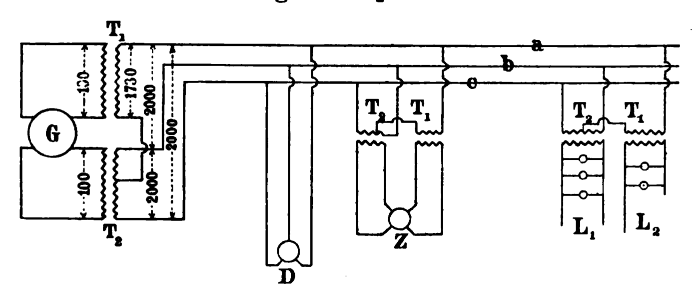
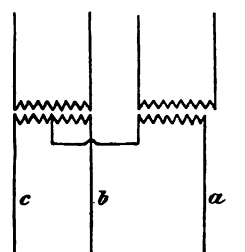


Fig. 255. Schaltung bei dem Systeme von Scott.

diese Weise drei Klemmen A, B, C, an die ohne weiteres das Dreileitersystem angeschlossen werden kann.

Da die Ströme, die die primären Wickelungen von T_1 und T_2 durchfliessen, einen Phasenunterschied von 90^0 besitzen, so besitzen auch die in den Sekundärspulen erzeugten Ströme diese Phasenunterschiede. Da ausserdem die in AO vorhandene Spannung (vgl. Fig. 257) nicht mit demselben Umsetzungsverhältnis transformiert wird, wie CB, sondern sich die sekundären Spannungen wie die Seite eines gleichseitigen Dreiecks zu dessen Höhe, wie $1 : \frac{\sqrt{3}}{2}$ verhalten, so entstehen zwischen den Klemmen AB und AC (vergl. das Spannungsdiagramm Fig. 257) resultierende Spannungsunterschiede, die den Spannungsunterschieden zwischen A und B an Grösse gleich, aber in der Phase um je 120^0 dagegen verschoben sind.



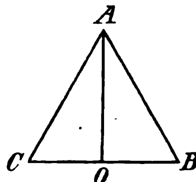




Fig. 256. Schaltung der Transformotoren bei Scotts System.

Fig. 257. Spannungsdiagramme bei dem Systeme von Scott.

Es wird also in der That durch diese eigentümliche Anordnung das Zweiphasensystem des Stromerzeugers in den Leitungen, die von A, B, C ausgehen, in ein Drehstromsystem verwandelt und Drehstrom fortgeleitet.

An den Verwendungsstellen können nun entweder ohne weiteres Drehstrommotoren angeschlossen werden, oder es kann durch zwei in derselben Weise, wie vorher beschrieben, geschaltete Transformatoren (vergl. Fig. 255) der Drehstrom wieder in zwei Gruppen von einfachen Wechselströmen zurück transformiert werden, die um 90° in der Phase gegen einander verschoben sind. Jeden einzelnen dieser Wechselströme kann man nun zur Speisung von Beleuchtungskörpern oder beide zusammen zum Betrieb von Zweiphasenmotoren verwenden.

Fig. 255 stellt ein solches Verteilungssystem unter Anwendung der Scott'schen Schaltungen dar. G bedeutet die Maschine, die den Zweiphasenstrom erzeugt, T_1 T_2 sind die nach Scott geschalteten Transformatorengruppen, Z ist ein Zweiphasenmotor, D ein Drehstrommotor und L_1 und L_2 sind zwei mit einfachem Wechselstrom betriebene Lampengruppen.

8. Das Verteilungssystem von Ferraris und Arnò.[1])

Der wichtigste Teil dieses neuen Verteilungssystems ist ein von den Erfindern Verschiebungstransformator genannter Apparat Diese Vorrichtung beruht auf der Beobachtung der bisher unbekannt gebliebenen, aber theoretisch leicht erklärbaren Thatsache, dass ein Zweiphasenstrommotor, dessen eine Wickelung von gewöhnlichem Wechselstrom gespeist wird, und dessen Anker sich in Umlauf befindet, in der zweiten, um eine halbe Polbreite versetzten Wickelung einen sehr nahe um 90° in der Phase gegen den ersten verschobenen Wechselstrom liefert.

Wenn man diese zweite Wickelung BB' des Zweiphasenmotors (vergl. Fig. 258) aus einer Anzahl von Windungen herstellt, die zur Zahl der Windungen AA', die vom primären Wechselstrom durchflossen werden, in einem gewissen Verhältnis steht, so ist auch die an den Klemmen der zweiten Wickelung BB' entstehende EMK der primären gleich; wenn man dagegen die sekundäre Wickelung aus mehr oder weniger Windungen bestehen lässt, so kann man eine beliebig höhere oder beliebig niedrigere EMK erzeugen.

Wenn die zweite oder sekundäre Wickelung BB' mit der primären AA' nicht einen Winkel von 90°, sondern einen kleineren

[1]) Weitere Einzelheiten über diese äusserst beachtliche Erfindung enthält die Broschüre: Galileo Ferraris und Riccardo Arnò, ein neues System zur elektrischen Verteilung der Energie mittels Wechselströmen. Deutsch von Heim. Weimar, Steinert, 1896.

oder grösseren Winkel einschliesst, so beträgt auch der Phasenunterschied des in BB′ induzierten, sekundären Stromes gegen den in AA′ fliessenden primären Strom nicht mehr nahezu 90°, sondern der Phasenunterschied ist ungefähr im Verhältnisse der Winkel geringer oder grösser.

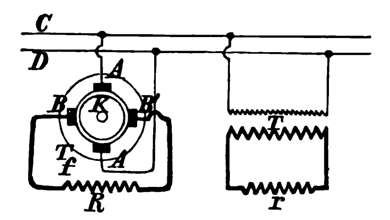


Fig. 258. Gebrauch eines Verschiebungstransformators und eines gewöhnlichen Transformators.

Der Gebrauch des Verschiebungstransformators ist also einfach der, dass man den zu diesem Zwecke verwendeten Zweiphasenstrommotor als asynchronen Wechselstrommotor unbelastet anlaufen lässt, wobei die um eine Viertelperiode versetzte sekundäre Wickelung BB′ zunächst offen bleibt. Nachdem der Anker eine angemessene Umlaufszahl erreicht hat, schliesst man den Stromkreis der sekundären Wickelung und verwendet den dort erzeugten, in der Phase gegen den ersten verschobenen Wechselstrom nach Bedarf.

Es bedarf kaum des besonderen Hinweises, obgleich die Erfinder dies nicht besonders erwähnt haben, dass man auch mit einem Dreiphasenmotor in gleicher Weise verfahren könnte. Man kann eine der drei Wickelungen, die in diesem Falle nicht verkettet sein dürften, mit gewöhnlichem Wechselstrom speisen und lässt den Motor als asynchronen Einphasenmotor anlaufen. Die in den beiden anderen Wickelungen induzierten EMKräfte würden eine Phasenverschiebung von 60°, beziehentlich 120° gegen einander zeigen und könnten weiterhin mit dem ersten Strom zusammen oder mit einem durch einen gewöhnlichen Transformator umgesetzten Teil dieses Stromes verkettet und als Drehstrom verwendet werden.

In Fig. 258 ist CD die Leitung, die einfachen Wechselstrom führt. Mit dieser Leitung ist die eine (primäre) Wickelung AA′ des als Verschiebungstransformators dienenden Zweiphasenmotors verbunden. In der zweiten um 90° gegen die erste versetzten (sekun-

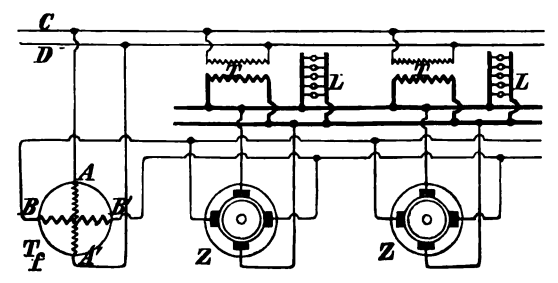


Fig. 259. Zweiphasenverteilung von einer einfachen Wechselstromleitung nach Ferraris und Arnò.

dären) Wickelung BB′ wird dann die um 90° in der Phase gegen die primäre verschobene Wechselspannung induziert, und diese erzeugt in dem Widerstande R einen Wechselstrom.

Nehmen wir an, der ursprüngliche, in CD fliessende Wechselstrom habe eine Spannung von 1000 Volt, und der in der sekun-

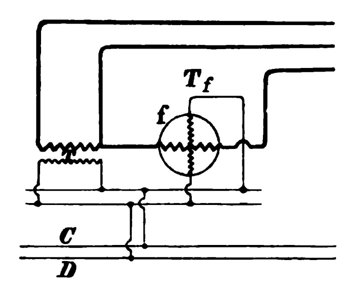




Fig. 260. Zweiphasensytem mit nur drei Leitern.

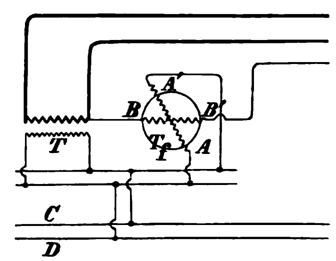


Fig. 261. Drehstrom erzeugt durch einen Verschiebungstransformator und einen gewöhnlichen Transformator.

dären Wickelung BB′ des Verschiebungstransformators induzierte Wechselstrom habe eine Spannung von 100 Volt.

Legt man nunmehr an CD noch einen gewöhnlichen Transformator T mit dem Umsetzungsverhältnis 10 : 1, so hat man nunmehr in den beiden in R und in r induzierten Strömen zwei um 90° in der Phase verschobene Wechselströme vor sich, die zum Betriebe eines Zweiphasensystems oder zum Anlauf oder Betrieb von Motoren verwendet werden, oder auch nach dem Scott'schen Verfahren (vergl. S. 347) in ein Dreiphasensystem verwandelt werden können.

Fig. 259 erläutert, wie etwa ein solches durch einen Verschiebungstransformator T_f und gewöhnliche Transformatoren T, T.. gespeistes Zweiphasenverteilungssystem aussehen würde.

Z, Z.. sind hierbei Zweiphasenmotoren, LL... Lampen.

Die Fig. 260 zeigt ferner, wie man dadurch, dass man eine Klemme der sekundären Wickelung des Verschiebungstransformators T_f mit einer Klemme der sekundären Spule eines gewöhnlichen Transformators T verbindet, auch ein Zweiphasensystem mit nur drei Leitungen (vergl. S. 248) herstellen kann.

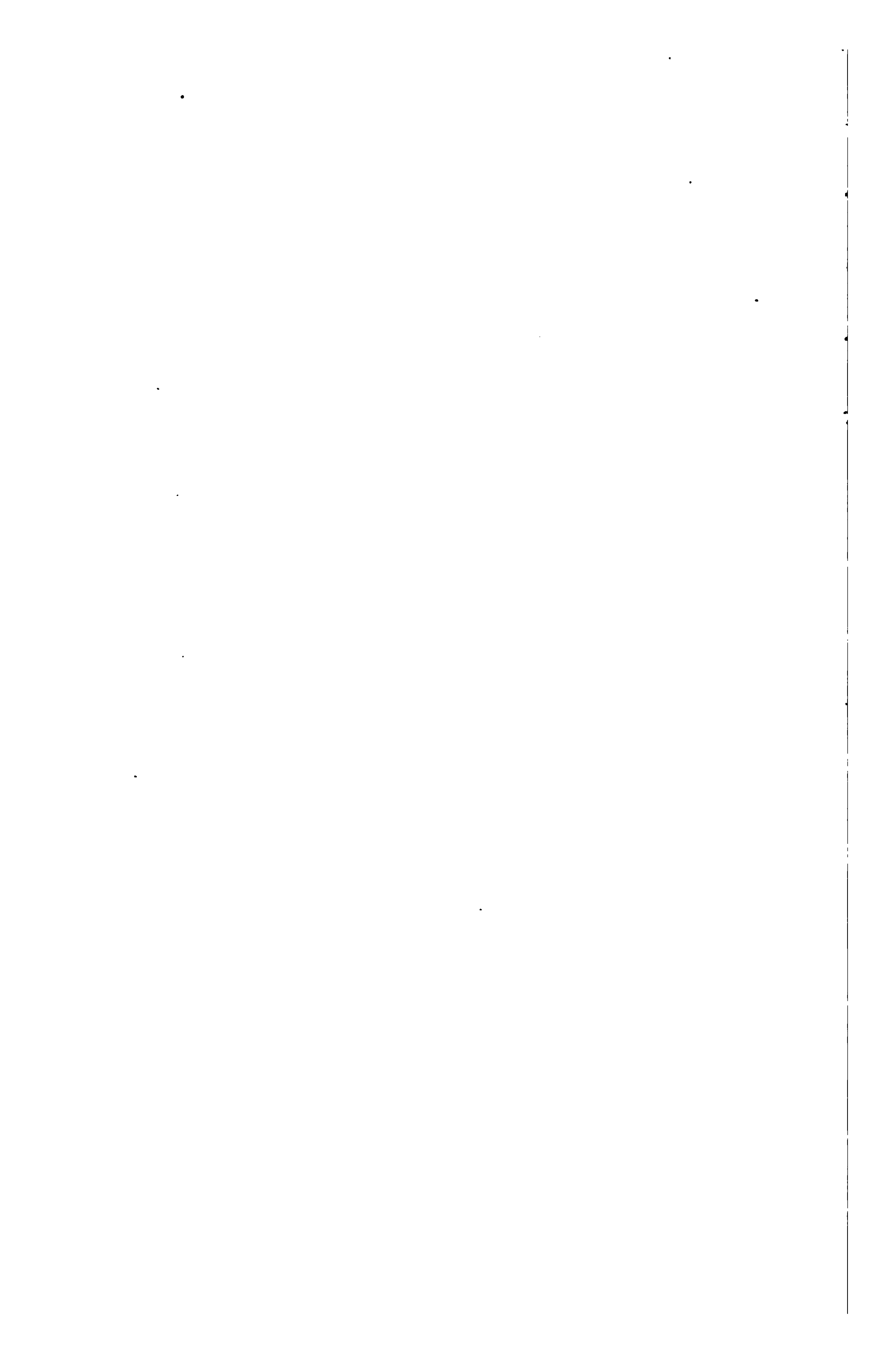
Durch die nächstfolgende Abbildung (Fig. 261) endlich wird erläutert, wie durch eine unter passendem Winkel schräg gestellte sekundäre Wickelung eines Verschiebungstransformators T_f und durch einen gewöhnlichen Transformator T ein Drehstromnetz gespeist werden kann. CD ist auch hier, wie vorher, die Leitung, die gewöhnlichen Wechselstrom führt.

Namen- und Sachregister.

(Die Zahlen beziehen sich auf die Seiten.)



Druck von Oskar Leiner in Leipzig. 40746



Elektrotechnischer Verlag von Oskar Leiner, Leipzig,

Königsstrasse 26 B.

Krüger, E. A. Die Herstellung der elektrischen Glühlampe. Nach in den verschiedensten Glühlampen-Fabriken gesammelten praktischen Erfahrungen gemeinverständlich erörtert. Zum praktischen Gebrauch für Fabrikanten, Ingenieure, Techniker, Installateure, Monteure und Konsumenten. gr. 8°. 109 Seiten mit 72 Abbildungen und 5 Tafeln. Brosch. ℳ 3.—, geb. ℳ 3.50.

Inhalt: Konstruktion. Gestalt der Glühlampen, die bekanntesten Kontakte und Fassungen. Die Fabrikation der Glühlampe. Das Lager. Das Eingipsen der Lampen und Anlöten der Kontakte. Das Färben und Ätzen der Glühlampe. Tabellen.

Le Blanc, Professor Dr. **Max. Lehrbuch der Elektrochemie.** Gr. 8° 226 Seiten mit 32 Figuren.

Brosch. ℳ 4.80, geb. ℳ 5.80.

Hauptkapitel-Überschriften: I. Einführung. Grundbegriffe der Elektricitätslehre. II. Entwickelung der Elektrochemie bis zur Gegenwart. III. Theorie der elektrolytischen Dissociation von Arrhenius. IV. Wanderung der Ionen. V. Leitfähigkeit der Elektrolyte. VI. Elektromotorische Kräfte. Konzentrationsketten. Flüssigkeitsketten. Allgemeine Betrachtungen über Konzentrations- und Flüssigkeitsketten. Thermoketten. Spannungsgesetze. Chemische Ketten. Bestimmung einzelner Potentialunterschiede. Ketten, bei denen die Ionen liefernden Stoffe nicht Elemente sind. Potentialdifferenz zwischen festem und flüssigem Metall. Polarisation. Anhang. Die gebräuchlichen galvanischen Elemente Die Akkumulatoren.

Neureiter, Ingen. **Ferd. Die Verteilung der elektrischen** Energie in Beleuchtungsanlagen. gr. 8°. 257 Seiten mit 94 Figuren.

Brosch. ℳ 6.—. In Halbfranzband geb. ℳ 7.50.

Grundbegriffe. Die Glühlampe. Die Bogenlampe. Die Akkumulatoren. Die Wechselstrom-Transformatoren. Die Verteilung der elektrischen Energie in Leitungsnetzen. Die Verteilungssysteme für Gleichstrom- und für Ein- und Mehrphasen-Wechselstrombetrieb. Die Vorausberechnung der elektrischen Leitungen nach den technischen Anforderungen, sowie mit Rücksicht auf die Bedingungen der Sicherheit und Ökonomie.

Peschel, Ing., **A. Hilfsbuch für die Montage elektrischer** Leitungen zu Beleuchtungszwecken. Für Elektrotechniker, Monteure und Installateure zur praktischen Anlage und Behandlung des Leitungsmaterials. Gr. 8°. IV und 240 Seiten mit 322 Abbildungen. Brosch. ℳ 5.—, geb. ℳ 6.—.

Prasch, Adolf u. **Hugo Wietz. Die elektrotechnischen Masse.** Lehrbuch zum Selbststudium. Dargestellt und durch zahlreiche Beispiele und 38 in den Text gedruckte Figuren erläutert. gr. 8°. 153 Seiten. Brosch. ℳ 3.—, geb. ℳ 3.50.

Inhalt: Die mechanischen Masse. Die magnetischen Masse. Die elektrostatischen Masse. Die elektromagnetischen Masse. Die internationalen Masseinheiten. Anhang: Magnetismus. Elektricität.

Wilke, Ingen. **Arthur. Der elektrotechnische Beruf. Eine kurzgefasste** Darstellung des Bildungsganges und der Aussichten des Elektrotechnikers, des Elektrochemikers und der elektrotechnischen Gewerbetreibenden. Zweite vermehrte Auflage. gr. 8°. 128 Seiten. Brosch. *M* 2.25.

Inhalt: Was ist Elektrotechnik? Was ist ein Elektrotechniker? Was hat der Elektrotechniker zu leisten? Welche Kenntnisse muss der Elektrotechniker haben? Wie wird man Elektrotechniker? Notwendige Nebenkenntnisse. Welche Aussichten hat der Elektrotechniker? Der Elektrochemiker. Der Galvanotechniker. Kleininstallateur. Der elektrotechnische Monteur. Der Kaufmann in der Elektrotechnik. Nachweis über die Anstalten für Ausbildung der Elektrotechniker.



Druck von Oskar Leiner in Leipzig. 14608

